

STANISŁAW BOUFFAŁŁ.

KRÓTKI RYS FIZYKI



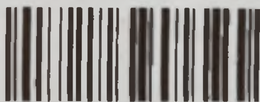
Stevens Point, Wis.
WYDAWNICTWO BRACI WORZAŁŁÓW
1911



STANISŁAW BOUFFAŁŁ.

KRÓTKI RYS FIZYKI





Stevens Point, Wis.
Wydawnictwo Braci Worzałłów.
1911.


BIBLIOTHECA
VNIV.
IAGELL.
CRACOVIENSIS

I

O ruchu. --- O siłach. --- O energii.

I.

O PRĘDKOŚCI I PRZYŚPIESZENIU

§ 1. **Spoczynek i ruch.** Stojąc na pokładzie płynącego statku, jesteśmy w spoczynku względem tego statku,ale poruszamy się względem morza. Statek, stojący na kotwicy, jest w spoczynku względem morza, ale bierze udział w obrocie dziennym ziemi, a więc porusza się względem gwiazd. A zatem jedno i to samo ciało może być w spoczynku względem jednych ciał, będąc jednocześnie w ruchu względem innych ciał.

§ 2. **Prędkość.** Ruch ciała może odbywać się z większą lub mniejszą p r ę d k o ś c i ą. Ciało, posiadające prędkość większą, przebywa pewną oznaczoną drogę w czasie krótszym, aniżeli ciało, posiadające prędkość mniejszą. Jeżeli ciało porusza się w taki sposób, że przebywa równe drogi w czasach równych, to ruch taki nazywa się r u c h e m j e d n o s t a j n y m.

Prędkość ruchu jednostajnego jest to liczba jednostek długości, przebytych w jednostce czasu; prędkość tę znajdujemy, dzieląc długość dowolnego kawałka drogi przez czas, zużyty na przebycie tego kawałka.

Pociąg, który ruchem jednostajnym przebiega 360 metrów w przeciągu 30 sekund, posiada prędkość 360:30=12 metrów na sekundę.

§ 3. **Jednostki czasu, długości i prędkości.** Jako jednostek czasu i długości fizycy dzisiejsi używają najczęściej tak zwanej średniej sekundy słonecznej i centymetra. Średnia sekunda słoneczna jest to $\frac{1}{24 \times 60 \times 60} = \frac{1}{86400}$ część średniej doby słonecznej, wskazywanej przez zwykłe nasze zegary. Centymetr jest to jedna setna część tak zwanego metra normalnego, którym jest odległość pomiędzy dwiema kreskami na sztabie platynowej, przechowywanej we francuskiem archiwum państwowem w Paryżu. Odległość tę bierze się przy temperaturze 0^0 Celsjusza. Obwód południka ziemskiego równa się czterdziestu milionom metrów.

Jednostką pola czyli powierzchni jest dla fizyków centymetr kwadratowy czyli pole kwadratu, którego bok równa się jednemu centymetrowi. Jednostką objętości jest centymetr sześcienny czyli objętość sześcianu, kórego krawędź równa się centymetrowi.

W myśl tej samej zasady jednostką

prędkości będzie prędkość, którą posiada ciało,gdy ruchem jednostajnym przebywa długość jednego centymetra w ciągu jednej sekundy. Nasz pociąg z poprzedniego paragrafu przebywa 1,200 centymetrów na sekundę, posiada więc prędkość, równą 1,200 jednostkom prędkości.

§ 4. **Jednostki zasadnicze i jednostki pochodne.** Jednostki pola i objętości utworzyliśmy przy pomocy jednostki długości; jednostkę prędkości utworzyliśmy przy pomocy jednostki długości i jednostki czasu. Jednostki, do których utworzenia użyto innych jednostek, nazywamy jednostkami pochodnemi w przeciwstawieniu do jednostek zasadniczych, przy pomocy których tworzymy owe jednostki pochodne.

Jednostki długości i czasu są dla nas jednostkami zasadniczemi; jednostki pola objętości i prędkości są jednostkami pochodnemi (§§ 16 i 19).

§ 5. **Prędkość w ruchu niejednostajnym.** Jeżeli ciało porusza się ruchem niejednostajnym, jak pociąg, który przyśpiesza lub zwalnia biegu, to wówczas nie może być mowy o jakiejś jednej prędkości, wspólnej dla całego trwania ruchu, ponieważ prędkość pociągu zmienia się ciągle. Możemy mówić wtedy jedynie o prędkości pociągu w pewnej określonej chwili.

Chcąc znaleźć tę prędkość, odliczamy począwszy od danej chwili przedział czasu na tyle drob-

ny, żeby w ciągu niego ruch pociągu można było uważać za jednostajny, i notujemy długość drogi, którą pociąg przebywa w ciągu tego czasu. Niech tym przedziałem będzie np· ¼ sekundy. Jeżeli w ciągu tej ćwierci sekundy pociąg przebył 2 metry, to powiadamy, że prędkość jego w danej chwili wynosiła 2:¼=8 metrów na sekundę.

§ 6. **Kierunk prędkości.** Kierunek, w którym ruch się odbywa, nazywamy kierunkiem prędkości. Powiadamy, że prędkość ciała nie zmienia kierunku, jeżeli ciało porusza się po linii prostej, nie cofając się· W każdym innym wypadku mówimy,że prędkość zmienia swój kie runek. Powiadamy, że prędkość ciała jest niezmienna, jeżeli nie zmienia ona ani wielkości swojej, ani kierunku. W każdym innym wypadku prędkość jest zmienna. Prędkość pociągu, biegnącego ruchem jednostajnym po torze zakrzywionym, jest zmienna, albowiem chociaż wartość liczebna prędkości nie ulega zmianie, to jednak zmienia się jej kierunek.

§ 7. **Składanie i rozkładanie prędkości.** Często widzimy, że ruch ciała jest wynikiem, wypadkiem kilku rozmaitych ruchów, odbywających się jednocześnie· Tak np. ruch rzeczywisty (ruchem rzeczywistym będziemy nazywali zmianę położenia względem ziemi) piłki, toczącej się po pokładzie płynącego statku, jest wynikiem dwóch ruchów: 1) ruchu piłki względem pokładu i 2) ruchu statku względem ziemi (mo-

rza). Istotnie, taka piłka, tocząc się, zmienia swe miejsce na statku a jednocześnie jest unoszona wraz z tym statkiem po powierzchni wody, wykonywa więc jakgdyby dwa ruchy. Podobne dwa ruchy wykonywa mrówka, idąca po stole, który przesuwamy z jednego miejsca pokoju na drugie. Znając prędkość (zarówno co do kierunku jak i co do wielkości) piłki względem pokładu statku tudzież prędkość statku względem wody, można znaleźć prędkość rzeczywistą piłki.

Prędkość ta nosi nazwę prędkości w y p a d k o w e j w przeciwstawieniu do dwóch pierwszych, które nazywają się prędkościami s k ł a d o w e m i.

Tak samo, znając dwie prędkości składowe mrówki, możemy znaleźć jej prędkość wypadkową. Czynność taka nazywa się s k ł a d a n i e m prędkości. Jeżeli statek płynie np. z zachodu na wschód z prędkością 300 centymetrów na sekundę, a piłka toczy się po pokładzie w tym samym kierunku z prędkością 80 centymetrów na sekundę, to wypadkowa prędkość piłki wynosi 300+80=380 centymetrów na sekundę (z zachodu na wschód). Jeżeli piłka toczy się ze wschodu na zachód, to wypadkowa prędkość jej wynosi 380—80=220 centymetrów na sekundę. Jeżeli piłka toczy się prostopadle lub ukośnie względem kierunku, w którym płynie statek,to wtedy dla znalezienia jej prędkości wypadkowej trzeba się już zwrócić do geome-

tryi, która daje sposób określenia tej prędkości w każdym wypadku zarówno co do wielkości jak i co do kierunku. Nie możemy tutaj zajmować się rozwiązywaniem tego zagadnienia.

Czasem bywa rzeczą dogodną wyobrazić sobie, że dana prędkość ciała składa się jakgdyby z dwóch prędkości oddzielnych. Tak np. jeżeli widzimy łódkę, płynącą z biegiem rzeki, to możemy sobie wystawić, że na prędkość jej rzeczywistą składają się dwie prędkości: z jednej strony prędkość, z którą wioślarz posuwa łódkę względem otaczającej ją masy wody, z drugiej strony prędkość samej masy wodnej. Takie postępowanie nazywa się r o z k ł a d a n i e m danej prędkości na prędkości składowe.

§ 8. **Przyśpieszenie.** Jeżeli prędkość ciała nie pozostaje niezmienną, to powiadamy, że ruch ciała posiada p r z y ś p i e s z e n i e. W mechanice znaczenie terminu przyśpieszenie jest daleko ogólniejsze, niżby to wnosić można z brzmienia samego wyrazu. Ruch posiada przyśpieszenie nietylko wtedy, gdy ciało przyśpiesza biegu, ale i wtedy, gdy zwalnia ono biegu, a także gdy zbacza od linii prostej, jednem słowem, gdy w prędkości ciała zachodzi jakakolwiek zmiana, czy to co do wielkości, czy też co do kierunku. Z pomiędzy wszystkich możliwych ruchów jedynie tylko ruch jednostajny po linii prostej nie posiada przyśpieszenia, każdy inny ruch posiada przyśpieszenie. Tak np. ruch pociągu biegnącego po zakrzywionym torze za-

wsze posiada przyśpieszenie, chociażby prędkość nie zmieniała swej wielkości.

§ 9. **Ruch jednostajnie przyśpieszony.** Jeżeli ciało porusza się po linji prostej w taki sposób, że prędkość jego wzrasta o równe wielkości w czasach równych, to ruch taki nazywa się ruchem jednostajnie-przyśpieszonym.

Jeżeli biegnący po linji prostej pociąg, który w pewnej danej chwili posiadał prędkość 400 centymetrów na sekundę, posiada po upływie 5-iu sekund prędkość 500 centymetrów na sekundę, po upływie następnych pięciu sekund prędkość 600 centymetrów na sekundę, po upływie dalszych pięciu sekund prędkość 700 centymetrów na sekundę, to taki ruch pociągu jest jednostajnie-przyśpieszony. Przyśpieszeniem ruchu jednostajnie przyśpieszonego nazywamy przyrost prędkości, przypadający na jednostkę czasu.

W przykładzie naszego pociągu na każdą sekundę przypada przyrost prędkości, równy 100:5=20 centymetrom na sekundę czyli 20 jednostkom prędkości.

Za jednostkę przyśpieszenia obieramy takie przyśpieszenie, przy którem w ciągu każdej sekundy prędkość ciała wzrasta o jednostkę prędkości, innemi słowy takie przyśpieszenie, przy którem w ciągu każdej następ-

nej sekundy ciało przebywa drogę o centymetr dłuższą, aniżeli w ciągu poprzedniej sekundy.

Przyśpieszenie naszego pociągu równa się 20 jednostkom.

Doświadczenie wykazuje, że ciała spadają na ziemię ruchem jednostajnie przyśpieszonym, w którym przyśpieszenie równa się 981 jednostce przyśpieszenia (§§34 i 38), innemi słowy ciało, spadające swobodnie na ziemię, przebywa w ciągu każdej następnej sekundy drogę o 981 centymetrów dłuższą od drogi, przebytej w ciągu poprzedniej sekundy.

Ruchem jednostajnie - opóźnionym nazywa się ruch, w którym prędkość zmniejsza się w równych czasach o wielkości równe. Powiadamy w mechanice, że ruch taki posiada przyśpieszenie skierowane wstecz. Ciało, rzucone pionowo do góry, porusza się ruchem jednostajnie opóźnionym, w którym przyśpieszenie wstecz wynosi 981 jednostek przyśpieszenia.



II.

O SIŁACH.

§ 10 **Pierwsze prawo ruchu Newtona.** Jeżeli ciało, które dotąd znajdowało się w spoczynku, zaczyna się poruszać, to przypuszczamy, że nie dzieje się to nigdy bez jakiegoś działania ze strony innych ciał, bez jakiejś podniety zewnętrznej, której nadajemy ogólne miano siły. Ciało, będące w stanie spoczynku, trwa w nim dopóty, dopóki nie zostanie zmuszone do wyjścia z tego stanu przez jakąś siłę z zewnątrz pochodzącą.

Jeżeli z dwóch jednakowo uderzonych piłek jedna potoczy się po trawniku a druga po gładkiej ścieżce, to pierwsza zatrzyma się o wiele wcześniej niż druga. Dlaczego? Tłómaczymy to sobie tem, że w pierwszym wypadku ruchowi piłki sprzeciwia się większa siła (tarcia) niż w drugim. Im gładsza powierzchnia, tem mniejsza siła tarcia, tem dłużej trwa ruch piłki. Takie i tym podobne spostrzeżenia doprowadziły do wniosku, że gdyby można było uwolnić piłkę

z pod wpływu wszelkich sił zewnętrznych, to piłka ta, raz w ruch wprowadzona, nie zatrzymałaby się nigdy, lecz biegłaby wiecznie "przed siebie" ruchem jednostajnym po linii prostej.

Wogóle, jeżeli prędkość ciała zmienia się bądź co do kierunku, bądź co do wielkości, to dzieje się to zawsze za sprawą sił zewnętrznych; gdzie istnieje przyśpieszenie, tam zawsze domyślać się należy istnienia siły.

Powyższe spostrzeżenia zawarte są w tak zwanem pierwszem prawie ruchu Newtona, które brzmi:

Każde ciało zachowuje swój stan spoczynku lub ruchu jednostajnego po linii prostej, dopóki nie zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez siłę z zewnątrz działającą.

§ 11. **Wielkość, kierunek i punkt przyłożenia siły**. Nazwaliśmy siłą podnietę zewnętrzną, która sprawia to, że prędkość ciała ulega zmianie, innemi słowy, że ciało otrzymuje przyśpieszenie. W każdej sile rozróżniamy wielkość, kierunek i punkt przyłożenia. O wielkości siły sądzimy z wielkości zmiany, sprawionej przez nią w ruchu ciała. Punktem przyłożenia siły zowie się punkt ciała, na który siła jest bezpośrednio wywierana. Kierunkiem siły nazywamy kierunek, w

którym usiłuje ona poruszyć swój punkt przyłożenia.

§ 12. **Równowaga sił. Siły równe.** Powiadamy, że siły, przyłożone do ciała,są w równowadze jeżeli działania wywierane przez nie na to ciało, znoszą się wzajemnie· Ciało zachowuje się wówczas pod względem swego ruchu w taki sposób jakgdyby sił tych nie było wcale. Jeżeli wszystkie siły, przyłożone do ciała, równoważą się wzajemnie, to ciało albo pozostaje w spoczynku albo też porusza się ruchem jednostajnym po linii prostej (§ 10). Taka równowaga sił zachodzi we wszystkich wypadkach, gdy wóz, pociąg, łódka itp. poruszają się jednostajnie po linii prostej. Przyłożona do ciał tych siła pociągowa (konia, lokomotywy, wioślarza) równoważy się w każdej chwili z siłami, sprzeciwiającemi się ruchowi, jak tarcie kół o drogę, opór powietrza, opór wody etc., tak iż w ostatecznym wyniku toczący się jednostajnie pociąg, wóz lub płynąca łódka zachowują się w taki sposób, jak gdyby na nie nie działały żadne siły.

Powiadamy, że dwie siły są równe co do wielkości, jeżeli, działając na punkt ciała w kierunkach wprost przeciwnych, równoważą się wzajemnie·

§ 13. **O mierzeniu sił.** Zmierzyć siłę możemy sposobem dwojakim: możemy albo daną siłę zrównoważyć (§12) inną jakąś, znaną nam siłą, albo też daną siłę ocenić bepośrednio po-

dług wywoływanych przez nią skutków ruchowych (§ 8).

§ 14. **Metoda grawitacyjna.** Przy pomiarach pierwszego rodzaju najchętniej posługujemy się siłą ciężkości, t. j. siłę, której wielkość mamy oznaczyć, porównywamy z ciężarem, który pewne ciało, raz na zawsze określone, posiada w miejscu, gdzie wykonywamy doświadczenie (§ 38). Za ciało takie obieramy zazwyczaj kopię tak zwanego k i l o g r a m a   n o r m a l n e g o, tj. bryły platynowej, przechowywanej we francuskiem archiwum państwowem w Paryżu.

Do uskutecznienia pomiarów służy przyrząd zwany wagą sprężynową albo dynamometrem (siłomierzem). W najprostszej swej postaci dynamometr jest to sprężyna spiralna, przytwierdzona górnym swym końcem do nieruchomego haka. Zawieszając u dolnego jej końca kolejno ciężary 1 kg., 2 kg., 3 kg., otrzymamy szereg wydłużeń, przyczem w każdym wypadku siła sprężysta wydłużonej sprężyny,równoważąca zawieszony ciężar, jest mu równa co do wielkości, jako przyłożona do tego samego punktu a skierowana wprost przeciwnie (§12). Podobnież,gdy przyłożymy zamiast ciężaru siłę nieznaną, którą mamy zmierzyć, siła sprężyny równać się będzie co do wielkości tej sile nieznanej. Stąd wynika, że jeżeli wydłużenie sprężyny w wypadku siły nieznanej wynosi np. tyle, ile wynosiło w

wypadku 5 kg., to siła nieznana równa się liczebnie 5 kg.

Ciężar jednego kilograma stanowi tak zwaną ciężarową czyli grawitacyjną jednostkę siły.

§ 15. **Siła a przyśpieszenie.** Doświadczenie stwierdza, że ciało swobodne, poddane działaniu siły stałej (tj. siły, której wielkość i kierunek nie zmieniają się) porusza się ruchem jednostajnie przyśpieszonym: gdyby leżało w naszej mocy usunąć siły, sprzeciwiające się ruchowi, tj. opory, to ciała takie, jak pociąg, wóz, łódka, poddane działaniu stałej siły pociągowej poruszyłaby się nie ruchem jednostajnym lecz ruchem jednostajnie przyśpieszonym.

Jeżeli na dane ciało działa siła zmienna, to, podzieliwszy czas jej działania na przedziały tak drobne, żeby w ciągu każdego z nich można było uważać za stałą, sprowadzamy badanie siły zmiennej do badania jakgdyby szeregu sił stałych, z których każda działa w ciągu bardzo krótkiego czasu. Zaznaczywszy to, możemy w dalszym ciągu zajmować się jedynie siłami stałemi.

Przystępując do zapowiedzianego w paragrafie 13 oceniania wielkości siły podług wywoływanych przez nią skutków ruchowych, zakładamy po pierwsze, że siła jest tem większa, im większe j e s t p r z y ś p i e s z e n i e, którego udziela ona ciału; jeżeli siła Nr. 1 udziela pewnemu ciału przyśpieszenia 5 razy większego, aniżeli siła Nr. 2, to powiadamy, że siła Nr. 1 jest 5 razy większa od siły Nr. 2.

§ 16. **Masa.** Lecz doświadczenie stwierdza, że jedna i ta sama siła udziela różnym ciałom przyśpieszeń niejednakowych: jedno i to samo uderzenie nadaje znaczną prędkość piłce i zaledwie rusza z miejsca kulę armatnią. Powiadamy, że dzieje się to dlatego, że kula armatnia posiada większą m a s ę aniżeli piłka.

A zatem masa ciała jest to ta jego własność, której mniejszy lub większy stopień w ciele sprawia, że nabywa ono łatwiej lub trudniej przyśpieszenia: jeżeli pod działaniem jednej i tej samej siły ciało A nabywa przyśpieszenia 3 razy w i ę k s z e g o, aniżeli B, to powiadamy, że masa ciała A jest 3 razy m n i e j s z a od masy ciała B.

Za jednostkę masy obieramy w fizyce masę kilograma normalnego (t. j. tego samego kawałka platyny, którego ciężar służy nam za jednostkę grawitacyjną siły), albo też jedną tysiączną część tego kilograma, t. j. masę jednego g r a m a. Centymetr sześcienny wody dystylowanej przy 4°C posiada masę prawie ściśle równą jednemu gramowi.

§ 17. **Masa a ciężar.** Chociaż w jednem i tem samem miejscu kuli ziemskiej dwa ciała, mające równe masy równoważą się na szalkach wagi, t. j. mają ciężary równe, niemniej przeto nie należy nigdy zapominać o tem, że m a s a i c i ę ż a r tego ciała są to dwie rzeczy najzupełniej różne. Masa ciała jest cechą ciała czysto wewnętrzną, całkiem niezależną od otoczenia i

bezwzględnie niezmienną, gdy tymczasem ciężar ciała jest siłą, mającą swe źródło zewnątrz ciała i zależną w zupełności od położenia ciała względem innych ciał. Gdybyśmy jakiekolwiek ciało przyczepili do haczyka czułej wagi sprężynowej i zaczęli wagę tę obwozić po różnych miejscach kuli ziemskiej, spuszczać się z nią do szybów kopalnianych i wdrapywać się na góry (§38), to przekonalibyśmy się, że wydłużenie sprężyny byłoby raz większe, raz mniejsze, tj. ciało ważyłoby raz więcej, raz mniej· Gdybyśmy mogli umieścić dane ciało na odległości równej tej, w jakiej znajduje się od nas księżyc, to ciężar ciała spadłby poniżej 1.3000 części, to znaczy,że np. gwicht 3 kilogramowy nie ważyłby nawet i grama; ale masa tego gwichtu pozostałaby niezmienioną, równą 3 kilogramom. Wystrzelona na tej odległości kula karabinowa — powiada profesor Warburg— nie posiadałaby prawie żadnego ciężaru, ale masa jej pozostałaby niezmienioną, wskutek czego przy spotkaniu z ciałem ludzkiem kula taka wywarłaby działanie nie mniej mordercze od tego, które wywiera, będąc w posiadaniu całkowitego swego "ziemskiego" ciężaru.

§ 18. **Drugie prawo ruchu Newtona.** Jeżeli widzimy, że pewna dana siła udziela ciału pewnego danego przyśpieszenia, to na zasadzie §§ 15 i 16 mamy prawo powiedzieć, że siła ta jest tem większa, im większe jest udzielone przyśpieszenie i tem

większa, im większa jest masa poruszonego ciała.

Wobec tego zakładamy, że siła równa się iloczynowi z masy poruszonego ciała przez udzielone mu przyśpieszenie. Za jednostkę siły obieramy w fizyce taką siłę, która masie jednego grama udziela jednostki przyśpieszenia (§9) t. j. siłę, która, działając na masę jednego grama, powiększa w ciągu każdej sekundy prędkość tego grama o jeden centymetr na sekundę. Taka jednostka siły nazywa się dyną.

Siła, która masie 5 kilogramów udziela przyśpieszenia równego 20 jednostkom, równa się $5 \times 1000 \times 20 = 100000$ dyn. Siła ciężkości udziela masie kilograma (jak zresztą każdej masie) przyśpieszenia, równego 981 jednostkom (§ 38), a zatem ciężar kilograma, czyli t. zw. siła jednego kilograma równa się $1 \times 1000 \times 981 = 981000$ dyn.

Zasada, na mocy której mierzymy siły iloczynem z masy poruszanego ciała przez udzielone mu przyśpieszenie, nosi w nauce nazwę drugiego prawa ruchu Newtona. Zasada ta pozwala nam obliczać siły w jednostkach tak zwanych bezwględnych t. j. w jednostkach, utworzonych przy pomocy 3-ch jednostek zasadniczych: długości, masy i czasu, gdy tymczasem w metodzie grawitacyjnej (§ 14) mierzenie sił ograniczało się do porównywania sił niezna-

nych z siłą znaną, mianowicie z ciężarem pewnego określonego ciała (kilograma normalnego).

§ 19. **Układ miar C. G. S.** (centymetr gram sekunda). Przekonamy się w dalszym ciągu niniejszego zarysu, że wszystkie jednostki, któremi wypadnie nam posługiwać się w fizyce, mogą być utworzone przy pomocy 3-ch jednostek zasadniczych: długości, masy i czasu, podobnie jak zostały już utworzone jednostki prędkości (§ 3), przyśpieszenia (§ 9) i siły (§ 18). Układ powstałych w ten sposób jednostek nazywa się układem bezwzględnym w przeciwstawieniu do układów względnych, w których każda jednostka posiada swój własny, od innych jednostek niezależny wzorzec.

Tak np. układ, w którym za jednostkę siły służy siła kilograma albo przeciętna siła konia i t.p. jest układem względnym, ponieważ ani jedna ani druga z tych jednostek siły nie daje się sprowadzić bezpośrednio do jednostek długości, masy i czasu.

Z pomiędzy układów bezwzględnych najogólniej przyjął się w fizyce układ, w którym jednostkami długości, masy i czasu są centymetr, gram i sekunda, a który znany jest pod skróconą nazwą układu C-G-S (centymetr-gram-sekunda). Dyna jest jednostką siły w układzie C-G-S.

§ 20. **Zasada niezależności działania sił.** Działanie siły na ciało nie zależy od tego, czy

ciało to było przedtem w spoczynku, czy w ruchu, ani też od tego, czy dana siła działa na ciało sama jedna czy też w "towarzystwie" innych sił: zawsze i w każdym wypadku *siła udziela ciału takiego przyśpieszenia, jakiegoby mu udzieliła, gdyby działała sama jedna, a ono znajdowało się w spoczynku.*

Stąd wynika, że ciało, na które działa kilka sił jednocześnie, otrzymuje jednocześnie kilka niezależnych od siebie przyśpieszeń, z których każde może być skierowane w inną stronę. Wynikiem wszystkich tych przyśpieszeń będzie pewna zmiana w ruchu ciała, przyczem mogę zajść dwa wypadki:

Albo ta sama zmiana, która zachodzi w ruchu ciała za sprawą wszystkich danych sił, daje się uskutecznić za pomocą jednej tylko siły, przyłożonej do ciała.

Albo też zmiany takiej uskutecznić za pomocą jednej tylko siły nie można.

W pierwszym wypadku powiadamy, że dany "komplet" sił, przyłożonych do ciała, *posiada wypadkową*, w drugim — że *wypadkowa taka nie istnieje*, t. j. że nie można sobie wyobrazić takiej siły, któraby sama jedna wywołała skutek, równy skutkowi, wywołanemu przez dany "komplet" sił (składowych).

§ 21. **Składanie i rozkładanie sił.** Określanie

wielkości i kierunku siły wypadkowej na podstawie kierunków i wielkości sił składowych nazywa się składaniem sił i odbywa się w ten sam sposób, co składanie prędkości. Nie mogąc wdawać się tutaj w rozbiór tej kwestyi, zaznaczamy tylko, że otrzymanie siły wypadkowej jest zawsze możliwe, jeżeli siły składowe albo są przyłożone wszystkie do jednego punktu ciała, albo są skierowane tak, że linie, wyobrażające ich kierunki, przecinają się wzajemnie, albo wreszcie jeżeli są równoległe i zwrócone w jedną stronę. Tak np. można zawsze zastąpić jedną siłą — siły kilku ludzi, ciągnących łódkę za sznury, poprzyczepiane do kółka tej łódki (siły, przyłożone do jednego punktu ciała). Podobnież dają się zastąpić jedną siłą siły, wywierane przez parę koni na haki powozu, do których przyczepione są orczyki (siły równoległe i zwrócone w jedną stronę).

Jako przykład układu sił, nie mających wypadkowej, wymienić można układ, złożony z dwóch sił równych, równoległych, lecz zwróconych w strony przeciwne: taki układ sił, zwany parą sił, nie daje się zastąpić jedną siłą. Działanie pary sił na ciało jest wyłącznie obracające: puszczając bąka, przykładamy zwykle parę sił do dwóch przeciwległych punktów jego obwodu.

Rozłożyć daną siłę na siły składowe jest to wyobrazić sobie kilka sił takich, żeby działanie ich na ciało mogło zastąpić w zupeł-

ności działanie danej siły. Takie rozkładanie siły na siły składowe często oddaje w mechanice wielkie usługi, ułatwiając znakomicie zbadanie działania siły.

§ 22. **Trzecie prawo ruchu Newtona** brzmi: Każdemu działaniu towarzyszy równe mu i wprost przeciwnie skierowane oddziaływanie, to znaczy że siły, które wzajemnie wywierają na siebie każde dwa ciała, są sobie równe liczebnie i posiadają kierunki wprost przeciwne.

Według tego prawa siła nie występuje nigdy pojedyńczo, lecz zawsze sprzężona jest nierozłącznie z siłą równą i wprost przeciwną. Jeżli książka,leżąca na stole,ciśnie nań z góry na dół wskutek swego ciężaru, to i stół wskutek swej sprężystości ciśnie na książkę z równą siłą z dołu do góry; jeżeli rozciągam ręką taśmę gumową, to z taką samą siłą, z jaką ręka ciągnie za taśmę, taśma ciągnie za rękę; jeżeli ziemia przyciąga pomarańczę z siłą 200 gramów czyli $200 \times 981 = 196200$ dyn, to i pomarańcza przyciąga ziemię z siłą 196200 dyn itd.

§ 23. **Opór bezwładny.** Usiłując poruszyć z miejsca ciało o wielkiej masie, np. wóz ładowany, uczuwamy znaczny opór, chociażby wóz ten stał na szynach gładkich i ściśle poziomych t.j. chociażby tarcie było stosunkowo nieznaczne, a siła ciężkości nie sprzeciwiała się wcale ruchowi wozu (ciężar wozu, jako siła działająca pionowo, nie wpływa na ruch wozu, odbywający

się w kierunku poziomym). Ten sam wóz, raz wyprowadzony ze spoczynku, daje się już względnie łatwo posuwać dalej ruchem jednostajnym. Taki sam opór, jakiego doświadczamy przy ruszaniu ciała z miejsca, występuje zawsze, ilekroć usiłujemy zmienić prędkość ciała, a więc także przy zatrzymywaniu ciała, będącego już w ruchu, przy każdem zwiększaniu lub zmniejszaniu prędkości, wreszcie przy każdej zmianie kierunku — jednem słowem można powiedzieć, że opór ten ukazuje się zawsze jednocześnie i znika ze zniknięciem przyśpieszenia, **t. j. z chwilą gdy** ruch ciała staje się jednostajnym prostoliniowym.

O wielkości tego oporu, który nosi miano *oporu bezwładnego*, wnioskujemy z wielkości siły, która idzie na jego pokonywanie: powiadamy mianowicie, że liczebnie opór bezwładny ciała równy jest w każdej chwili tej sile, zaś skierowany jest wprost przeciwnie. Jeżeli w pewnej danej chwili wywieramy na wóz siłę 100 kg. ($100 \times 1000 \times 981 = 981100000$ dyn), z których część, wynosząca 20 kg. idzie na pokonanie tarcia, to opór bezwładny wozu w owej chwili równa się liczebnie sile $100 - 20 = 80$ kg. albowiem taka właśnie siła idzie wtedy na jego pokonanie.

§ 24. **Siła dośrodkowa i opór bezwładny odśrodkowy.** Ciało, obiegające ruchem jednostajnym po kole, musi wciąż otrzymywać przyśpieszenie, któreby zakrzywiało jego drogę, albo-

wiem w przeciwnym razie droga ta musiałaby być prostoliniową (§ 10). Istnieje zatem, siła, udzielająca ciału tego przyśpieszenia. Można dowieść, że siła ta jest skierowana stale ku środkowi koła, po którem obiega ciało; nosi ona wskutek tego miano *siły dośrodkowej*.

Jeżeli ciałem obiegającem po kole jest kamień, uwiązany na sznurku, to źródłem siły dośrodkowej jest sprężyste napięcie sznurka. Jeżeli chodzi o obieg księżyca dokoła ziemi, to źródłem siły dośrodkowej jest tajemnicze co do swej istoty przyciąganie, wywierane przez ziemię.

Z chwilą przecięcia sznurka, na którym uwiązany jest kamień, znika siła dośrodkowa, znika więc przyśpieszenie, przez nią udzielane, zakrzywiające drogę kamienia; to też odlatuje on natychmiast po linii prostej w kierunku, w którym poruszał się w ostatniej chwili przed przecięciem sznurka. Podobnież odleciałby w przestrzeń księżyc z chwilą, w której ziemia przestałaby go przyciągać.

Zarówno kamień jak księżyc stawiają opór zmianie, którą w prędkości ich wywołuje siła dośrodkowa, sprowadzająca je ustawicznie z prostej drogi. Ten opór bezwładny ciał, obiegających po kole, równa się liczebnie sile, która go w każdej chwili pokonywa (§ 23), t. j. sile dośrodkowej, lecz skierowany jest w stronę przeciwną, t. j. od środka koła nazewnątrz. Na-

zywamy go wskutek tego **o p o r e m b e z w ł a d n y m o d ś r o d k o w y m** (mniej właściwą jest używana pospolicie nazwa siły odśrodkowej). Dzięki istnieniu oporu bezwładnego odśrodkowego możemy np. obracać po kole pionowem kubek wody bez obawy jej wylania: opór bezwładny odśrodkowy, powstający w wodzie przy szybkim obiegu po kole, przyciska ją do dna kubka. Obręcz sprężysta, wprawiona w szybki obrót dokoła osi, przechodzącej przez jej środek, spłaszcza się w kierunku tej osi, wydłużając się w kierunku poprzecznym (fig. 1), wskutek tego, że opory bezwładne odśrodkowe części obręczy, obiegających po większych kołach, są większe od oporów części, położonych bliżej końców osi.

Obliczono, że siła dośrodkowa, działająca na ciało, położone na równiku, wynosi około $\frac{1}{300}$ części ciężaru tego ciała. Tyleż wynosi opór bezwładny odśrodkowy ciała, lecz ponieważ jest on s k i e r o w a n y w stronę przeciwną, t. j. od środka ziemi nazewnątrz, przeto działanie jego równoważy, znosi $\frac{1}{300}$ c z ę ś c i


Fig. 1

przyciągania, wywieranego przez ziemię na dane ciało. To znaczy, że gdyby ziemia przestała się obracać, to wraz ze zniknięciem oporu bezwładnego odśrodkowego odzyskałaby wpływ swój owa $\frac{1}{300}$ część przyciągania ziemskiego, i ciężar każdego ciała na równiku powiększyłby się o $\frac{1}{300}$ część swej dzisiejszej wartości.



III.

O PRACY I ENERGII.

§ 25. **Praca siły.** Powiadamy, że siła pracuje, jeżeli za jej sprawą porusza się jej punkt przy łożenia. Niema więc pracy bez ruchu ciała, do którego siła jest przyłożona. Dopóki kamień leży spokojnie na wieży, siła ciężkości działa nań wprawdzie, przyciskając go do podstawy, lecz nie wykonywa żadnej pracy; zaczyna ona pracować dopiero z chwilą, gdy kamień zacznie spadać. Podczas rozciągania sprężyny siła mięśniowa ręki mojej, przyłożona do końca tej sprężyny, pracuje, gdyż przesuwa swój punkt przyłożenia, ale z chwilą gdy zatrzymam rękę w miejscu, siła ta przestaje wykonywać pracę, choc nie przestaje działać na sprężynę, jak mi o tem wyraźnie mówi zmysł mięśniowy. Należy więc starannie rozróżniać wyrażenia: siła *działa* i siła wykonywa pracę, *pracuje*.

§ 26. **Miara pracy.** Za miarę pracy, wyko-

nywanej przez siłę, zgodzono się uważać iloczyn z wielkości siły przez długość drogi, przebytej przez jej punkt przyłożenia. Jednostką pracy jest praca, wykonana przez jednostkę siły na jednostce drogi. Do najczęściej używanych jednostek pracy należy kilogramometr, t. j. praca wykonana przez siłę, równą ciężarowi jednego kilograma, na drodze, równej jednemu metrowi. Koń, który, wywierając na wóz siłę, równą stale ciężarowi 50 kilogramów, przeciągnął go na przestrzeni 10 kilometrów, wykonał pracę równą $50\times10\times1000=500000$ kilogramometrów (siła mięśniowa konia wykonała pracę równą 500000 kgm.).

W układzie C-G-S jednostką pracy będzie praca, wykonana przez siłę jednej dyny na drodze jednego centymetra; jednostkę tę nazywamy ergiem. 10 milionów ergów stanowi jednostkę zwaną dżulem. Ponieważ ciężar kilograma przedstawia siłę, równą 981000 dynom, a metr — długość, równą 100 cm., przeto kilogramometr równa się $981000\times100=98100000$ ergów$=$ 9,81 dżulów. Gdy ciężarek 5-o miligramowy spada z wysokości 12 centymetrów, siła ciężkości wykonywa pracę $0{,}005\times981\times12=58{,}86$ ergów.

§ 27. **Praca jako pokonywanie oporów.** Gdy siła, wywierana przez konia, posuwa wóz po drodze prostej ruchem jednostajnym, wówczas, jak wiemy, równoważy się ona w każdej

chwili z siłą tarcia kół, która sprzeciwia się ruchowi: jeżeli siła pociągowa równa się 50 kg., to znaczy, że i siła tarcia równa się 50 kg. Stąd wynika, że dla obliczenia pracy, wykonanej przez konia, można drogę, którą wóz przebył, pomnożyć albo przez wielkość siły pociągowej, albo też przez wielkość pokonywanego oporu (siły tarcia). Wogóle, posługujemy się jednym lub drugim sposobem określania pracy zależnie od tego, czy lepiej znamy siłą wywieraną, czy też opór pokonywany. Tak np. gdy chodzi o podnoszenie ciężarów, to dogodniej jest obliczać pracę wykonaną jako iloczyn z drogi ciała przez opór pokonywany, ponieważ opór ten, stawiany ruchowi przez siłę ciężkości znany nam jest dokładnie (jest nim ciężar ciała), gdy tymczasem nie znamy bezpośrednio wielkości siły mięśniowej, wywieranej na podnoszone ciało.

Zgodnie z powyższą zasadą możemy powiedzieć, że *kilogramometr jest to praca, którą wykonywamy, podnosząc ruchem jednostajnym do wysokości 1 metra ciało o masie jednego kilograma.*

Obliczając pracę jako iloczyn z drogi ciała przez opór pokonywany, mieliśmy na myśli ruch jednostajny po linii prostej, w którym siła wywierana i opór pokonywany równoważą się wzajemnie. Atoli powyższem określeniem pracy, jako iloczynu z drogi przez opór, możemy

posługiwać się i w wypadku ruchu niejednostajnego, jeżeli do zwykłych oporów(tarcie, opór powietrza itp.) zgodzimy się dołączać jeszcze ów opór bezwładny, który powstaje w poruszającem się ciele za każdą zmianą jego prędkości.

§ 28. **Energia.** Energią ciała nazywamy tę własność ciała, która czyni je zdolnem do wykonywania pracy. Energię posiada np. wystrzelona kula armatnia, ponieważ może ona wywrzeć siłę (uderzenie) na inne ciało i bądź wprawiając je w ruch, bądź pokonywając w niem pewne opory, wykonać pewną ilość pracy. Taką samą energię posiada kamień spadający, beczka tocząca się, drzewo walące się, rzeka płynąca, wogóle każde ciało, będące w ruchu.

Ale ciało niekoniecznie musi być w ruchu, żeby posiadać zdolność wykonywania pracy. Łatwo zrozumieć, że kamień, umieszczony na szczycie wieży, rzeka zatrzymana u grobli, łuk napięty, posiadają też w pewnem znaczeniu zdolność wykonywania pracy czyli energię, wystarczy bowiem usunąć pewne przeszkody, a kamień zacznie spadać, rzeka płynąć, łuk rozprężać się itd.

Energia wystrzelonej kuli, kamienia spadającego, rzeki płynącej itd. ma swe źródło w ruchu tych ciał i nazywa się *energią ruchu* czyli *kinetyczną*. Energia kamienia leżącego na wieży, rzeki zatrzymanej, łuku napiętego wynika z położenia danego ciała wzglę-

dem innych ciał, wywierających na nie pewne siły, albo z wzajemnego położenia (w łuku) i nazywa się energią położenia lub energią *potencyalną* (możliwą).

§ 29. **Miara energii.** Energię ciała oceniamy podług ilości pracy, którą ciało zdolne jest wykonać, to znaczy, mierzymy ją jednostkami pracy — kilogramometrami i ergami. Przytem należy zauważyć, że dla obliczenia energii danego ciała niezawsze trzeba czekać, aż wykona ono rzeczywiście pracę, do której jest zdolne, w niektórych bowiem razach możemy znaleźć ilość tej energii na podstawie pewnych cech, które ciało dane posiada, zanim jeszcze zacznie pracować. Tak np. znając masę i prędkość poruszającego się ciała, możemy zawsze określić jego energię kinetyczną. Z rozważań, w które wdawać się tutaj nie możemy, okazuje się, że dla otrzymania energii kinetycznej ciała w ergach należy pomnożyć jego masę (w gramach) przez kwadrat prędkości (wyrażonej w centymetrach na sekundę) i podzielić iloczyn przez 2. Masa wody, równa 5000 kilogramów, płynąca z prędkością 20 centymetrów na sekundę, posiada energię kinetyczną równą:

$$\frac{5000 \times 1000.\ [20]+[20]}{2} =$$

1000000000 ergów = 100 dżulów; 30 gramowa kula karabinowa, biegnąca z prędkością 20000

centymetrów na sekundę, posiada energię kinetyczną równą:

$$\frac{30 \times [20000] \times [20000]}{2} =$$

6000000000 ergów czyli 600 dżulów.

Energia potencyalna ciała nie daje się obliczyć podług jednego ogólnego wzoru, jak to uczyniliśmy dla energii kinetycznej. Żeby określić zgóry wartość energii potencyalnej ciała w danem jego położeniu, trzebaby znać dokładnie prawa sił, działających na ciało. Otóż znajomość tę posiadamy tylko w razach wyjątkowych, w większości zaś wypadków zmuszeni jesteśmy określać energię potencyalną na drodze doświadczalnej. Jedynie doświadczalnie określić możemy energię potencyalną sprężyny nakręconej, łuku napiętego itp.

Do rodzajów energii potencyalnej, dających się obliczać teoretycznie, należy energia ciał ciężkich, t. j. energia, wynikająca ze wzniesienia ciał nad pewien określony, raz na zawsze obrany poziom. Wartość tej energii, wyrażona w ergach, równa się iloczynowi z ciężaru ciała, wyrażonego w dynach, przez wysokość, do której zostało ono podniesione, wyrażoną w centymetrach. 5-o kilogramowa cegła, umieszczona na szczycie 50-o metrowej wieży, posiada energię potencyalną równą $5 \times 1000 \times 981 \times 50 \times 100 = 24525000000$ ergów.

§ 30. **O przetwarzaniu się i przenoszeniu się energii.** Żeby wytworzyć w danem ciele pewną ilość energii, czy to kinetycznej, czy potencyalnej, trzeba zawsze wykonać pewną ilość pracy: pracy wymaga zarówno nadanie prędkości piłce, jak podniesienie kamienia do góry lub napięcie łuku. Możnaby zapytać odwrotnie: czy zawsze skutkiem wykonanej pracy bywa powstanie pewnej ilości energii?

Jeżeli przez energię będziemy rozumieli tylko taką jewną zdolność pracowania, jaką posiada biegnąca kula lub łuk napięty, to na pytanie powyższe wypadnie dać odpowiedź przeczącą. Istotnie, mieszając np. wodę w garnku, niewątpliwie wykonywamy pracę, nie otrzymując w ostatecznym wyniku ani energii kinetycznej, ani energii potencyalnej: po najdłuższem nawet mieszaniu, w które mogliśmy włożyć ogromną ilość pracy, woda nie nabędzie napozór najmniejszej zdolności do wykonywania pracy.

Ale tylko napozór. W rzeczywistości woda taka ogrzewa się i wskutek tego nabywa własności, które czynią ją zdolną do zwrócenia w pewnych okolicznościach części zasobu pracy, włożonego w jej ogrzanie. Przykład maszyny parowej poucza nas wymownie o tem, że ciało ogrzane, może wykonywać pracę, że więc posiada zdolność do wykonywania pracy. Wobec tego pozostaniemy w zgodzie z pierwotnie podanem określeniem energii (§ 28), jeżeli powie-

my, że każde ciało ogrzane posiada pewną ilość energii wynikającej stąd, że jego temperatura jest wyższa od temperatury innych ciał. Ten rodzaj energii nazywamy energią cieplną.

Mianem energii chemicznej, elektrycznej, magnetycznej i t. d. oznaczamy zdolność do wykonywania pracy, posiadaną przez ciała na skutek pewnych ich stanów i właściwości: proch strzelniczy posiada energię chemiczną, potarta laseczka laku energię elektryczną i t. d. Rozszerzywszy tym sposobem pojęcie energii daleko poza obręb energii jawnej czyli dynamicznej, którą poznaliśmy jako energię: kinetyczną i potencyalną, możemy teraz na pytanie, czy zawsze praca wytwarza energię, dać odpowiedź stanowczo twierdzącą: doświadczenie stwierdza, że, gdzie pozornie wynik wykonanej pracy jest żaden, gdzie zdaje się ona ginąć, nie pozostawiając po sobie ani śladu energii jawnej, tam zawsze ukazuje się któraś z pomiędzy postaci energii wewnętrznej, a więc energia cieplna, chemiczna, elektryczna itd. albo najczęściej mieszanina wszystkich tych postaci.

Ciało, posiadające energię w jakiejkolwiek jej postaci, jest przez to samo uzdolnione do wykonywania pracy. Wykonywając pracę, traci ono na energii a jednocześnie pewien zasób energii ukazuje w innych ciałach, przyczem ta ostatnia energia niekoniecznie musi mieć tę sa-

mą postać, którą miała energia, utracona przez dane ciało. Tak np. równocześnie ze znikaniem energii chemicznej węgla, spalającego się w piecu lokomotywy, ukazuje się energia cieplna w wodzie kotła, a znikaniu tej ostatniej energii towarzyszy powstawanie energii kinetycznej poruszających się wagonów. Przy rozprężaniu się łuku ginie jego energia potencyalna, a jednocześnie ukazuje się energia kinetyczna w strzale. Równocześnie ze zniknięciem energii kinetycznej młota ukazuje się w kowadle energia cieplna itd., itd. Fakt znikania energii w jednych ciałach i jednoczesnego jej ukazywania się w tej samej lub zmienionej postaci w innych ciałach, wyrażamy, mówiąc, że energia *przenosi się* z jednych ciał do drugich, przyczem przenoszeniu się temu może towarzyszyć jej *przetwarzanie się* z jednej postaci w drugą.

To przenoszenie się i przetwarzanie się energii nabędą dla nas znaczenia konkretniejszego dopiero wtedy, gdy, zapoznawszy się z poszczególnemi kategoryami zjawisk fizycznych (zjawiska cieplne, elektryczne, magnetyczne itp.), nauczymy się mierzyć odpowiednie postacie energii. Tutaj zaznaczyć tylko możemy, że, zgodnie z samem określeniem energii, pomiary energii niezależnie od jej postaci zawsze uskuteczniać będziemy w jednostkach pracy, a więc np. w ergach. Jeżeli zdołamy uprzytomnić sobie jasno tę okoliczność, że każdą ilość energii czy to

jawnej, dynamicznej, czy też wewnętrznej, jako to: cieplnej, chemicznej, elektrycznej itd. można wyrazić w ergach, to tem samem powinniśmy módz ująć najistotniejszą treść następującej zasady, zwanej zasadą zachowania energii:

Całkowita ilość energii we wszechświecie jest niezmienna: energia nie ginie i nie powstaje, może tylko przenosić się z jednego ciała do drugiego i przetwarzać się z jednej postaci w drugą.



IV.

O MASZYNACH. — O CIĘŻKOŚCI I GRAWITACYI.

§ 31. **Co to jest maszyna?** Maszyną w najogólniejszem znaczeniu tego wyrazu nazywamy przyrząd, którego przeznaczeniem jest równoważenie pewnych sił zewnętrznych, zwanych siłami poruszającemi, albo krócej—s i ł a m i.

Maszyna nazywa się prostą, jeżeli składa się z jednej tylko sztuki czyli "organu," t. j. jeżeli zarówno opory jak i siły poruszające przyłożone są do jednego i tego samego ciała. Maszyna złożona składa się z dwóch lub większej liczby organów, któremi są maszyny proste. Blok zwyczajny jest maszyną prostą, zarówno bowiem opór (ciężar podnoszony) tak i siła poruszająca (siła mięśniowa) przyłożone są do jednego i tego samego ciała (sznura). Natomiast lokomotywa jest maszyną złożoną,



Fig. 2

ponieważ pomiędzy tłokiem, do którego przyłożona jest siła poruszająca pary, a łańcuchem, do którego przyłożony jest opór, stawiany przez wagony, mamy tu cały szereg organów pośredniczących, z których każdy jest maszyną prostą.

Zauważmy tu nawiasowo, że maszyną właściwą, t. j. maszyną w znaczeniu, podanem na początku niniejszego §, albo jeszcze inaczej maszyną roboczą jest tylko ta część mechanizmu lokomotywy, która zawiera się pomiędzy tłokiem, a łańcuchem; uważana w swej całości, jako przyrząd, służący do przetwarzania energii chemicznej węgla na energię kinetyczną tłoka, lokomotywa jest m o t o r e m. Ta ostatnia nazwa przysługuje każdemu wogóle przyrządowi, który wzamian za dostarczoną sobie energię w jakiejkolwiek postaci, a więc cieplną, elektryczną, magnetyczną, chemiczną itd. dostarcza nazewnątrz energii kinetycznej.

§ 32. **Dźwignia.** Zasadniczemi maszynami prostemi są dźwignia i równia pochyła; do ich działania daje się sprowadzić działanie wszystkich innych maszyn prostych.

Dźwignię stanowić może każde ciało sztywne, dające się obracać dokoła stałej osi.

Weźmy wypadek najprostszy, w którym

dźwignia składa się z drąga AB (fig. 3), mogącego obracać się dokoła ostrej krawędzi c, zaś opór i siła poruszająca p są siłami równoległemi i zwróconemi w jedną stronę. Jak wiadomo (§21), siły takie można zawsze zastąpić jedną siłą wypadkową. Otóż jeżeli potrafimy urządzić się tak, żeby kierunek tej wypadkowej przeszedł przez krawędź c, to działanie jej zostanie zniesione przez oddziaływanie sprężyste tej krawędzi (§22), i drąg pod względem ruchu swego zachowa się tak, jakgdyby nań nie działały żadne siły (przyjmujemy, że ciężar samego drąga jest znikomo mały w porównaniu z siłami q i p). Stąd wynika, że jeżeli dane są zgóry wielkości oporu q i siły poruszającej p, to chcąc żeby ich wypadkowa została zniesiona, trzeba krawędź c umieścić w odpowiednio dobranem miejscu pod drągiem. Jeżeli przeciwnie, dany jest opór q i określony jest zgóry punkt c, w którym przypada oś drąga, to wówczas dla zrównoważenia oporu q siłą poruszającą p, przyłożoną do końca A drąga, trzeba dobrać odpowiednio wielkość tej siły p.

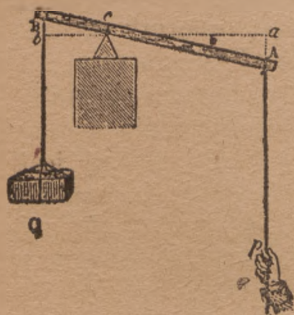


Fig. 3

Można dowieść, że siła poruszająca p, która ma zrównoważyć opór q, powinna być od niego

tyle razy większa lub mniejsza, ile razy odcinek ca jest mniejszy od odcinka cb. Bezpośrednim wynikiem tego związku pomiędzy siłami, przyłożonemi do dźwigni, jest możność zrównoważenia dowolnie wielkiego oporu za pomocą dowolnie małej siły pod warunkiem,że oś dźwigni zostanie umieszczona w odpowiednio obranem miejscu (mianowicie odpowiednio blizko oporu). Słynne jest powiedzenie, przypisywane Archimedesowi: "Dajcie mi punkt oparcia, a podźwignę ziemię."

Przy podnoszeniu kamienia robotnik wywiera siłę poruszającą na punkt B drąga (fig. 4), mogącego obracać się dokoła krawędzi podstawki C. Z drugiej strony ciężar kamienia, stanowiący w danym wypadku opór, przyłożony jest do punktu A drąga. Jeżeli odległość punktu



Fig. 4. Dźwignia.

A od krawędzi C jest 10 razy mniejsza, aniżeli odległość punktu B od tejże krawędzi, to każ-

dy kilogram siły, wywieranej przez robotnika, równoważy 10 kilogramów ciężaru kamienia, tak iż dla podniesienia (ruchem jednostajnym) kamienia, ważącego 500 kilogramów, wystarczy wywrzeć siłę 50 kilogramów.

W rozpatrzonym przez nas wypadku opór i siła poruszająca były przyłożone do punktów, znajdujących się po różnych stronach osi dźwigni, i skierowane w jedną stronę. Nie jest to wszakże jedyny sposób, w jaki można przykładać siły do dźwigni. Tak np. w taczkach (fig. 5) zarówno opór V jak i siła poruszająca A znajdują się po jednej stronie od osi B i przytem skierowane są w strony przeciwne. W szczypcach (fig. 6), które można uważać za kombinacyę dwóch drągów, posiadających wspólną oś obrotu w miejscu swego połączenia, opór i siła poruszająca znajdują się także po jednej stronie osi, ale opór (chwytanego ciała) przyłożony jest tutaj dalej od osi, aniżeli siła poruszająca (wywierana przez palce), gdy tymczasem w taczkach rzecz się ma odwrotnie. To też gdy w taczkach, podobnie jak w drągu do podnoszenia ciężarów, małą siłą równowa-

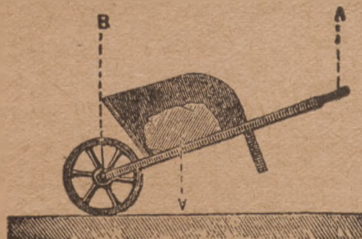


Fig. 5. Taczki.

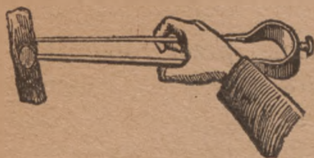


Fig. 6. Szczypce.

żymy znaczny opór, w szczypcach, przeciwnie, używamy znacznej siły do zrównoważenia małego oporu: naciskając ręką mocno, chwytamy dany przedmiot lekko.

Widzieliśmy, że, uzbroiwszy się w dźwignię możemy, rozporządzając małą siłą, wywierać siłę znaczną, że zatem, posługując się dźwignią, niejako stwarzamy siłę, jakkolwiekbyśmy sobie wyobrażali takie stwarzanie siły, faktem jest niewątpliwym, że, używając dźwigni, możemy zyskać na sile, podobnie jak możemy zyskać na prędkości.

Na czem jednak zyskać nie możemy w żadnym razie, to na pracy. Podczas obrotu naszego drąga przy podnoszeniu kamienia (fig. 4) koniec A opisuje łuk koła 10 razy mniejszy, aniżeli koniec B. Przypuśćmy, że w pewnym czasie koniec A przebywa drogę równą 8 cm.; koniec B przebywa w tym samym czasie drogę 80 cm. Praca wykonana przez siłę 50 kilogramów, przyłożoną do końca B, równa się $50 \times 0{,}80 = 40$ kilogramometrów. Praca, wykonana przez koniec A przeciwko oporowi równemu 500 kg., wynosi $500 \times 0{,}08 = 40$ kilogramometrom. A zatem praca, wykonana przez robotnika "na dźwigni", jest ściśle równa pracy, wykonanej przez dźwignię "na ciężarze."

Ta równość pomiędzy pracą, wykonaną

przez siłę poruszającą, a pracą, wykonaną przeciwko oporowi, jest cechą całkiem ogólną,prawdziwą nietylko dla dźwigni lecz dla każdej bez wyjątku maszyny. Żadna maszyna nie może wydać więcej pracy nad tę, którą w nią wkładamy; żadna maszyna nie powinnaby także wydać mniej pracy, gdyby nie straty, spowodowane przez tarcie, wstrząśnienia itd.

Teorya przyrządów takich, jak blok i jego odmiany tudzież wszelkiego rodzaju kołowroty i koła zębate, daje się sprowadzić do teoryi dźwigni.

Weźmy np. blok zwyczajny, jakiego używają mularze do windowania wapna, i przypuśćmy, że siła poruszająca (siła mięśniowa robotnika) działa w kierunku pionowym, podobnie jak i opór (ciężar szkopka z wapnem). Blok taki przedstawia dźwignię, której osią jest oś bloka, a której ramionami są dwa promienie bloka poziome, t. j. te jego promienie, które wzięte razem stanowią jego średnicę poziomą. Ponieważ dźwigna ta jest, oczywiście, równoramienna, przeto siła poruszająca musi być równa oporowi, a więc i droga, którą przebywa ręka robotnika, musi być równa drodze, którą przebywa szkopek. Tym sposobem, posługując się takim blokiem, nie zyskujemy ani na sile, ani na prędkości, a cały pożytek z tej maszyny sprowadza się do tego, że daje nam ona możność podniesienia do góry ciężaru siłą, działającą na dół.

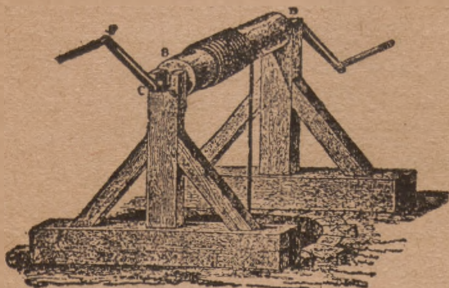


Fig. 7. Kołowrót.

Inaczej przedstawia się sprawa w kołowrocie, używanym do wyciągania wody ze studni. Tutaj mamy dźwignię o ramionach nierównych. Ramieniem krótszem jest promień wału, na który nawija się sznur od wiadra; ramieniem dłuższem jest promień koła cT, które zatacza korba. Ponieważ opór (ciężar wiadra z wodą) jest przyłożony do ramienia krótszego, a siła poruszająca (siła mięśni naszych) — do ramienia dłuższego, przeto posługując się kołowrotem, równoważymy opór większy siłą mniejszą i mianowicie tyle razy m n i e j s z ą , ile razy promień koła, które zatacza korba, jest w i ę k s z y od promienia wału. Zyskując na sile, tracimy na prędkości, gdyż wiadro przebywa drogę krótszą, aniżeli korba, ale praca, wykonana przez siłę mięśni naszych "na kołowrocie," równa jest zawsze pracy, wykonanej przez kołowrót "na wiadrze z wodą."

§ 33. **Równia pochyła.** Pochylona względem poziomu deska może zostać użyta jako

maszyna do podnoszenia ciężarów (fig. 8). Siłą jest tutaj siła, wywierana za pomocą sznurów, oporem — ciężar wtaczanego ciała; pierwsza działa równolegle do deski, drugi — pionowo.

Istota działania równi pochyłej polega na tem, że pewna część oporu (w danym wypadku ciężaru beczki) daje się zrównoważyć oddziaływaniem sprężystem samej deski, tak, iż sile poruszającej pozostaje do zrównoważenia jedynie pozostała część oporu. Mianowicie możemy sobie wyobrazić, że ciężar beczki rozłożony jest na dwie siły składowe (§21), z których jedna jest prostopadła do deski i zostaje zniesiona przez oddziaływanie tej ostatniej, zaś druga skierowana jest wzdłuż deski; tę to ostatnią siłę równoważy siła poruszająca.

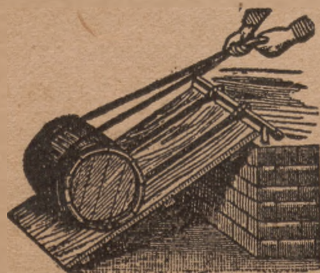


Fig. 8. Wtaczanie beczki po równi pochyłej.

Im mniej pochyłą równia, tem większą część oporu równoważy oddziaływanie deski, tem mniejszą część oporu ma do zrównoważenia siła poruszająca.

Można dowieść, że wielkość potrzebnej siły poruszającej tak się ma do wielkości całego oporu, jak wysokość równi do jej długości.

Jeżeli wysokość muru (fig. 8) wynosi 75 cm.,

a długość deski 225 cm., to do zrównoważenia beczki, ważącej 300 kilogramów, wystarczy siła poruszająca równa 100 kilogramom.

To samo rozkładanie oporu, które stanowi istotę równi pochyłej, odnajdujemy w klinie (fig. 9). Różnica polega na tem, że tutaj oporem jest nie ciężar lecz siły sprężyste, wywierane przez dwie połowy ciała, w które klin wbijamy. Zupełnie tak samo, jak w wypadku równi pochyłej, pewna część oporu zostaje zniesiona przez oddziaływanie sprężyste boków klina, tak iż siła poruszająca, wywierana na jego głowę, ma do zrównoważenia tylko pozostałą część oporu. Wielkość potrzebnej siły poruszającej tak się ma do wielkości całego oporu, jak szerokość klina do jego długości.



Fig. 9. Klin.

Nóż, siekiera, dłuto, gwóźdź, igła są to wszystko odmiany klina.

Do teoryi równi pochyłej daje się także sprowadzić teorya śruby.

§ 34. **Ciężar ciała.** Doświadczenie stwierdza, że ciało, spadające na ziemię, porusza się ruchem jednostajnie-przyśpieszonym: wnosimy stąd, że siła, która ruch ten wywołuje, jest siłą stałą (§ 38). Siłę tę nazywamy c i ę ż a r e m danego ciała.

Zauważono, że, o ile nie działają jakieś siły postronne, to za sprawą ciężkości wszystkie

ciała spadają na ziemię jednakowo prędko, tj. posiadają jedno i to samo przyśpieszenie (§ 38). W próżni (np. w rurce szklanej, z której zostało wypompowane powietrze), gdzie opór powietrza nie może wpływać na przebieg zjawiska, lekki puszek i kula ołowiana, puszczone razem, odbywają całą drogę razem (fig. 10).

Skoro tak jest, skoro przyciąganie ziemi nadaje jednakowe przyśpieszenie masie 10 gr. i masie jednego grama, to znaczy, że na pierwszą masę działa siła 10 razy większa, aniżeli na drugą: masy dwóch ciał są proporcyonalne do ich ciężarów.

Na każde ciało, spadające na ziemię, możemy patrzyć, jako na grupę ciał spadających razem. Gdybyśmy pokrajali jabłko na kawałki, a złożywszy je w jedną całość, pozwolili im spadać swobodnie (w próżni), to jabłko takie dobiegłoby do ziemi, nie rozsypując się na części. Każde więc ciało można uważać za zbiór cząstek, z których każda przyciągana jest przez ziemię z siłą proporcyonalną do swej masy, innemi słowy, posiada ciężar proporcyonalny do swej masy. Wypadkowa tych wszystkich sił jest oczywiście tem, co nazwaliśmy ciężarem danego ciała.



Fig. 10

§ 35. **Środek ciężkości.** Podzielmy w wyobraźni naszej dane ciało na cząstki tak drobne,

żeby, praktycznie biorąc, można je było uważać za punkty. Kierunkiem, w którym na każdą taką cząstkę działa jej ciężar, jest kierunek t. zw. pionowy, tj. kierunek linii prostej, łączącej daną cząstkę ze środkiem kuli ziemskiej. Ciężar całego ciała, czyli siła wypadkowa wszystkich tych ciężarów, posiada kierunek linii prostej, która z jednej strony przechodzi przez środek ziemi, zaś z drugiej strony "przenizuje" dane ciało w sposób ściśle określony, np. stojącą pionowo głowę cukru — od środka podstawy do wierzchołka, leżącą poziomo książkę od środka jednej okładki do środka drugiej okładki itd. Jeżeli zmienić oryentacyę danego ciała, np. położyć głowę cukru, postawić książkę itd., to linia prosta, przedstawiająca kierunek ciężaru, nie przestając przechodzić przez środek ziemi, trafia na inne punkty danego ciała aniżeli trafiała poprzednio, tak iż za każdą zmianą w oryentacyi cała linia ta zajmuje inne położenie wewnątrz ciała. Otóż godnym uwagi jest fakt że wszystkie kierunki, w których przebiegać może owa linia ciężaru przy wszelkich możliwych położeniach danego ciała, przecinają się w jednym i tym samym punkcie tego ciała. Powiadamy, że w punkcie tym leży środek ciężkości danego ciała.

Wobec tego możemy powiedzieć,że wszystkie siły, wywierane przez ziemię na cząstki ciała, innemi słowy, ciężary wszystkich cząstek daje

się zawsze zastąpić jedną siłą, przyłożoną do środka ciężkości, a skierowaną pionowo. Siłę tę nazwaliśmy ciężarem ciała (§ 34).

Stąd wynika, że jeżeli linia pionowa, przechodząca przez środek ciężkości ciała, napotyka na swej drodze punkt ciała podparty, to ciało znajduje się w równowadze, tj. zachowuje się tak, jak gdyby żadna siła nie działała na nie, albowiem ciężar ciała jest zniesiony przez sprężyste oddziaływanie podpory (§ 22) (równowaga ciała, opartego na ostrzu, zawieszonego na nici itp.). W razie istnienia kilku punktów podpartych, do zrównoważenia ciężaru wystarcza już to, gdy pion, przechodzący przez środek ciężkości ciała, trafia w punkt, położony wewnątrz konturu, okalającego wszystkie punkty ciała podparte (równowaga człowieka, stojącego na swych nogach, stołu, wozu na kołach itd.).

§ 36. **Waga** służy do porównywania ze sobą dwóch ciężarów, a co za tem idzie (§ 34) i dwóch mas. Jest to dźwignia, której oś (fig. 10, A) przypada w równych odległościach od obu końców, służących za punkty przyłożenia dla porównywanych ciężarów. Waga nieobciążona znajduje się w równowadze, gdy jej środek ciężkości przypada na linii pio-



Fig. 11 Waga.

nowej, przechodzącej przez oś dźwigni (§ 35); belka wagi (D) ustawia się wówczas poziomo. Jeżeli umieścimy na szalkach (C i E) ciężary równe, tj. jeżeli do końców dźwigni przyłożymy siły równe, to kierunek wypadkowej tych dwóch sił przejdzie przez oś wagi, wskutek czego działanie tej wypadkowej zostanie zniesione przez oddziaływanie sprężyste punktu oparcia, tak, iż belka wagi nie zmieni swego położenia poziomego (strzałka B pozostanie pionową). I odwrotnie, z tego, że po obciążeniu waga nie zmienia swego położenia, wnioskujemy, że umieszczone na szalkach ciężary, a więc i masy, są równe.

§ 37. **Spadanie ciał.** Wiemy już (§ 34), że ciało, puszczone swobodnie, otrzymuje za sprawą własnego swego ciężaru przyśpieszenie stałe, równe 981 jednostkom przyśpieszenia (porównaj § 38). Prędkość ciała, która w chwili rozpoczynania się ruchu równała się zeru, wynosi z końcem 1-ej sekundy 981 cm. na sekundę, z końcem 2-ej sekundy $2 \times 981 = 1962$ cm. na sekundę, z końcem 3-ej sekundy $3 \times 981 = 2943$ cm. na sekundę itd., itd. Zamiast liczby 981 weźmy dla uproszczenia rachunku liczbę okrągłą 1000, tj. przyjmijmy, że z końcem 1-ej sekundy prędkość ciała spadającego wynosi 1000 cm. na sekundę, z końcem 2-ej sekundy — 2000 cm. na sekundę, z końcem 3-ej sekundy — 3000 cm. na sekundę itd., itd.

W ciągu 1-ej sekundy ciało przebywa drogę

$$\text{równą } \frac{0+1000}{2} = 500 \text{ cm.},$$

w ciągu 2-ej sekundy drogę

$$\frac{1000+2000}{2}=1500 \text{ cm.},$$

w ciągu 3-ej sekundy drogę

$$\frac{2000+3000}{2}=2500 \text{ cm. itd. itd.}$$

Ciało, rzucone pionowo do góry z prędkością, dajmy na to, 3000 cm. na sekundę, posiada z końcem 1-ej sekundy prędkość 3000—1000= 2000 cm. na sekundę, i, przebiegłszy w ciągu tej sekundy drogę równą

$$\frac{3000+2000}{2}=2500 \text{ cm.},$$

znajduje się na wysokości 2500 cm.; z końcem 2-ej sekundy ciało posiada prędkość 2000—1000 =1000 cm. na sekundę i, przebiegłszy w ciągu tej sekundy drogę równą

$$\frac{2000+1000}{2}=1500 \text{ cm.},$$

znajduje się na wysokości równej 2500+1500= 4000 cm.; wreszcie z końcem trzeciej sekundy

ciało posiada prędkość 1000—1000=0 cm. na drogę równą

$$\frac{1000+0}{2}=500 \text{ cm.},$$

znajduje się na wysokości 4000+500=4500 cm. Odtąd, tj. z chwilą ostatecznego wyczerpania zapasu prędkości, ciało zaczyna spadać i łatwo obliczyć, że po upływie trzech sekund, znajdzie się na ziemi, przyczem prędkość jego w ostatniej chwili wynosić będzie 3000 cm. na sekundę.

Znając masę i prędkość ciała, możemy obliczyć jego energię kinetyczną (§ 29); znając ciężar ciała i wzniesienie jego po nad poziom, możemy obliczyć energię potencyalną ciała, wynikającą z działania siły ciężkości (§ 29). Niech danem ciałem będzie np. gwicht 50-gramowy. W chwili rzucania do góry — energia kinetyczna gwichtu równa się

$$\frac{50\times[3000]^2}{2}=\frac{50\times[3000]\,[3000]}{2}=$$

225000000 ergów, w tej samej chwili energia potencyalna równa się zeru, ponieważ wzniesienie gwichtu równe jest zeru. W końcu 3-ej sekundy, gdy prędkość gwichtu równa się zeru, energia kinetyczna gwichtu równa się oczywiście zeru; natomiast energia potencyalna gwichtu równa się:

$$50\times1000\times4500=225000000 \text{ erg.}$$

(ciężar gwichtu 50 gramowego przedstawia siłę 50×981 dyn, nie zaś 50×1000 dyn; ponieważ jednak w całym przykładzie liczbę 981, wyrażającą przyśpieszenie, zastępowaliśmy liczbą okrągłą 1000, przeto musimy uczynić to i tutaj).

Energia całkowita gwichtu, tj. suma jego energii kinetycznej i jego energii potencyalnej, wynosi więc w chwili rzucania 225 milionów ergów. W chwili, gdy gwicht zajmuje położenie najwyższe, jego energia całkowita równa się także 225 milionom ergów. Różnica polega na tem, że w pierwszej chwili gwicht posiada tylko energię kinetyczną, zaś w drugiej chwili tylko energię potencyalną. Nie dość na tem. Łatwo obliczyć, że energia całkowita gwichtu równa się tymże 225 milionom ergów w każdej chwili ruchu czy to podczas wznoszenia się, czy też podczas spadania: w pierwszym okresie maleje energia kinetyczna gwichtu, a wzrasta jego energia potencyalna; w drugim okresie dzieje się odwrotnie. W tem zjawisku wznoszenia się i spadania mamy przykład przetwarzania się energii kinetycznej ciała na potencyalną i odwrotnie, bez żadnej straty.

Przy spadaniu ciała swobodnego tudzież przy wznoszeniu się ciała, rzuconego pionowo, prędkość zmienia się co do wielkości lecz zachowuje swój kierunek. W każdej chwili siła przyciągania ziemi działa na ciało w tym samym kierunku pionowym, w którym zwrócona

jest prędkość już istniejąca, albo w kierunku wprost przeciwnym: wyrażamy to, mówiąc, że przyśpieszenie, udzielane ciału przez siłę, posiada tu w każdej chwili ten sam kierunek, co i prędkość, albo kierunek wprost przeciwny.

Inaczej mają się rzeczy w wypadku ciała, rzuconego ukośnie. I tutaj siła przyciągania działa w każdej chwili w kierunku pionowym, ale prędkość, już istniejąca, ma kierunek ukośny względem pionu, tak iż przyśpieszenie, udzielane ciału przez siłę, posiada kierunek ukośny względem prędkości, a wynikiem tego jest każdochwilowe zakrzywianie drogi ciała. Wskutek tego, ciało, rzucone ukośnie, zakreśla linię krzywą, której kształt zależy zarówno od wielkości jak i od kierunku prędkości początkowej.

§ 38. **O grawitacyi.** Powiedzieliśmy w § 34, że ciała spadają na ziemię ruchem jednostajnie przyśpieszonym, że zatem siła, która ruch ten wywołuje, jest siłą stałą. Jest to zdanie słuszne tylko w przybliżeniu, albowiem, ściśle rzecz biorą, ciężar ciała jest siłą zmienną.

Newton pierwszy wypowiedział twierdzenie, że każde dwa ciała zachowują się względem siebie tak, jakgdyby się przyciągały wzajemnie, przyczem wielkość siły, którą na siebie wywierają, zależy z jednej strony od ich mas, a z drugiej strony od ich wzajemnej odległości. Ta dążność ciał do wzajemnego zbliżania się, dą-

żność, która występuje zarówno pomiędzy dwoma sąsiednimi pyłkami, jak i pomiędzy dwiema gwiazdami, znajdującemi się na przeciwległych końcach wszechświata, nosi miano grawitacyi albo ciążenia powszechnego. Wypadkiem szczególnym grawitacyi jest ciężkość ciał, t. j. dążność ich do zbliżania się do ziemi, która ze swej strony usiłuje zbliżyć się do nich.

Przy ocenianiu odległości pomiędzy danem ciałem a ziemią, bierze się pod uwagę odległość pomiędzy środkiem ciężkości danego ciała a środkiem kuli ziemskiej. Jeżeli dane ciało znajduje się nazewnątrz powierzchni tej kuli, tj. na ziemi lub nad wodą, to ze wzrastaniem tej odległości ciężar ciała maleje: tak np. na szczycie góry każde ciało waży mniej niż na poziomie morza; na równiku ciało waży mniej niż na biegunie nietylko wskutek istnienia większego oporu odśrodkowego (§ 24), lecz także i dlatego, że znajduje się dalej od środka ziemi (z powodu spłaszczenia ziemi). Odwrotnie, jeżeli dane ciało znajduje się pod ziemią np. w głębi szybu kopalnianego, to ciężar ciała maleje ze zmniejszeniem odległości od środka ziemi.

Wszystkie te wahania są bardzo nieznaczne. W granicach, dostępnych bezpośredniemu badaniu, wielkość przyśpieszenia, udzielanego przez siłę ciężkości, nie bywa mniejsza od 978 jednostek ani też większa od 983 jednostek. Dla

całej Europy środkowej można przyjąć liczbę 981 (na poziomie morza).

Mówiliśmy w § 37 o ciałach, rzuconych z pewną prędkością początkową, które za sprawą jednoczesnego działania tej prędkości początkowej i swego ciężaru zakreślać mogą linie krzywe rozmaitego kształtu.

Otóż obieg księżyca dokoła ziemi możemy również przypisać jednoczesnemu działaniu jego ciężaru, który usiłuje ściągnąć go na ziemię, i początkowej prędkości, która sprawia, że księżyc nie spada na ziemię, lecz zakreśla dokoła niej linię krzywą (prawie dokładne koło).

Wychodząc z tej samej zasady, tłómaczymy ruch planet i komet dokoła słońca i wogóle wszelkie obiegi ciał niebieskich jednoczesnem działaniem ciążenia, które usiłuje zbliżyć do siebie dwa ciała, i prędkości początkowej, która sprawia, że zamiast spadku jednego ciała na drugie następuje obieg jednego ciała dokoła drugiego, po kole lub innej linii krzywej.



II

O cieczach. — O sprężytości. — O głosie.

I.

O CIECZACH.

§ 1. **Określenie cieczy.** Mieszając palcem wodę w szklance, nie uczuwamy żadnego prawie oporu (o ile nie czynimy tego wyjątkowo szybko), pomimo że zmieniamy ustawicznie kształt danej masy wody. Jeżeli, zamknąwszy tę samą wodę w walcu o ruchomym tłoku, zechcemy ścisnąć ją, tj. zmienić jej objętość, to poczujemy opór olbrzymi i mimo największych wysiłków nie zdołamy otrzymać widocznego zmniejszenia objętości. Opierając się na tych dwóch faktach, określamy ciecz jako ciało, które poddaje się łatwo najdrobniejszej sile, usiłującej zmienić jego kształt, lecz stawia opór nawet znacznym siłom, usiłującym zmienić jego objętość.

§ 2. **Ciśnienie hidrostatyczne.** Opierając się o stół dłonią, ciśniemy na całą powierzchnię, którą dłoń pokrywa; opierając się o stół końcem palca, ciśniemy na powierzchnię, którą po-

krywa ten koniec palca. Jeżeli w obu tych wypadkach wywieramy jedną i tę stamą siłę, np. siłę 2 kilogramów (to jest siłę, $2 \times 1000 \times 981 = 1962000$ dyn),to powiadamy, że ciśnienie całkowite w pierwszym wypadku jest równe ciśnieniu całkowitemu w drugim wypadku. Ale w pierwszym wypadku ciśnienie to rozpościera się na powierzchnię, pokrytą przez dłoń całą, w drugim wypadku — tylko na powierzchnię, pokrytą przez koniec palca, a zatem c i ś n i e n i e, przypadające na j e d n o s t k ę p o l a, będzie w drugim wypadku większe, aniżeli w pierwszym.

Jeżeli dłoń pokrywa 100 cm.^{2} stołu, a koniec palca ½ cm.^{2}, to w wypadku dłoni mamy ciśnienie, równe

$$\frac{2 \times 1000}{100} = 20 \text{ gramom}$$

($20 \times 981 = 19620$ dyn) na centymetr kwadratowy, zaś w wypadku palca — ciśnienie, równe

$$\frac{2 \times 1000}{\frac{1}{2}} = 4000 \text{ gramów}$$

na centymetr kwadratowy.

W układzie C.-G.-S. jednostką cieśnienia jest cieśnienie jednej dyny na cm.^{2}.

Ciśnieniem hidrostatycznem w danem miejscu nazywamy ciśnienie, przypadające w tem miejscu na jednostkę pola, przyczem przyjmuje się, że ciecz jest w spoczynku. Jeżeli na powierz-

chnię wody, zamkniętej w rurce o przekroju równym 25 cm., będziemy wywierali za pośrednictwem tłoka siłę (ciśnienie całkowite), równą 75 kg., to ciśnienie hidrostatyczne na powierzchi wody wynosić będzie $\frac{75}{35}=3$ kg. na cm^2, czyli 3000 gramów na cm^2, czyli $3000 \times 981 = 2943000$ dyn na cm^2.

Ciecze, jak wszystkie ciała na ziemi, poddane są działaniu siły ciężkości — są ciężkie. Jednakże, przy badaniu teoretycznem, często bywa rzeczą dogodną wyobrazić sobie, że ciecz jest wyłączona z pod wpływu siły ciężkości, tj. rozpatrywać ją tak, jak gdyby nie posiadała wcale ciężaru. (Możliwość takiego umyślnego, rzec można, zapominania o ciężarze cieczy zrozumiemy łatwo, jeżeli weźmiemy np. wypadek, w którym na ciecz działają siły tak znaczne, że w porównaniu z niemi ciężar cieczy znika prawie zupełnie).

§ 3. **Prawo Pascala.** W cieczy, *wyjętej z pod wpływu ciężkości*, ciśnienie hidrostatyczne jest wszędzie jednakowe.

Wyobraźmy sobie naczynie dowolnego kształtu (fig. 1), napełnione np. wodą, a zaopatrzone w otwory A, B, C, D, E, zamykane ruchomymi tłokami. Jeżeli na jeden z tych tłoków, np. na tłok A, którego przekrój poprzecz-

ny równa się 20 cm., wywrzemy siłę (ciśnienie całkowite) 40 kilogramów, to ciśnienie hidrostatyczne wody tuż pod A wyniesie $\frac{40}{20}=2$ kg. na centymetr kwadratowy. Otóż, podług prawa Pascala, ściśle takie same ciśnienie hidrostatyczne panuje w każdem miejscu cieczy (o ciężarze stosownie do umowy zapominamy zupełnie), a więc także i pod tłokami B, C, D i E.

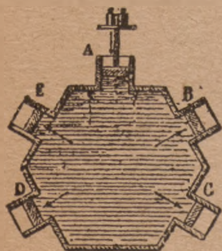


Fig. 1.

Jeżeli, jak to widzimy na fig. 1, wszystkie te tłoki mają jednakowy przekrój poprzeczny, to dla utrzymania ich w spoczynku trzeba na każdy z nich wywrzeć zzewnątrz siłę 40 kilogramów. Gdyby jednak tłok B miał np. przekrój 5 razy większy od przekroju tłoka A, to i siła, wywierana na tłok B, musiałaby być 5 razy większa od siły, wywieranej na A. W samej rzeczy, ciśnienie hidrostatyczne pod tłokiem B nie przestałoby równać się 2 kilogramom na cm^2., ale, ponieważ powierzchnia B byłaby równa nie 20 lecz $20\times5=100$ cm^2, przeto ciśnienie całkowite na

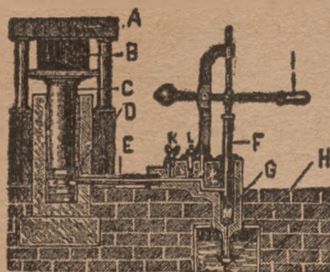


Fig. 2.

dolną powierzchnię B wynosiłoby $100 \times 2 = 200$ kg., tj. 5 razy więcej, niż ciśnienie na A.

§ 4. **Prasa hidrauliczna.** Zasada, na mocy której mała siła, wywierana w jednem miejscu masy cieczy, może wytworzyć znaczną siłę w innem miejscu tejże masy, została zużytkowana w maszynie, zwanej p r a s ą h i d r a u l i c z n ą. Maszynę tę, przedstawioną na fig. 2 stanowi zbiornik z wodą, składający się z dwóch łączących się ze sobą walców: szerokiego D i wązkiego M, w których chodzą tłoki C i F. Naciskając koniec dźwigni I, opuszczamy na dół cienki tłok F i w ten sposób za pośrednictwem wody wywieramy ciśnienie na dolną powierzchnię grubego tłoka C. Na mocy prawa Pascala ciśnienie h i d r o s t a t y c z n e jest jednakowe pod cienkim tłokiem i pod grubym, jak zresztą w każdem miejscu masy wodnej, wypełniającej zbiornik, ale c a ł k o w i t e ciśnienie, wywierane na dolną powierzchnię tłoka C, jest większe od całkowitego ciśnienia, wywieranego na wodę zbiornika przez tłok F: ile razy przekrój grubego tłoka jest większy od przekroju cienkiego tłoka, tyle razy siła, z którą tłok gruby

przyciska towar B do belki A, jest większa od siły, z którą tłok cienki jest wtłaczany do walca M.

Okazuje się więc, że w prasie hidraulicznej, posługując się małą siłą, stwarzamy siłę wielką. Łatwo jednak obliczyć, że pracy przez to nie stwarzamy, i że maszyna ta, jak każda zresztą maszyną; oddaje nam najwyżej tę samą ilość pracy,którą w nią włożyliśmy.Rzeczywiście jeżeli przekrój tłoka C jest 100 razy większy od przekroju tłoka F, to siła, wywierana przez C, jest 100 razy większa od siły, którą wywarliśmy na F.Ale w takim razie woda,która osunęła się, dajmy na to, o centymetr w walcu M, podniesie się zaledwie o $\frac{1}{100}$ centymetra w walcu C, a ponieważ praca mierzy się iloczynem z siły przez drogę (cz. I), przeto praca, wykonana przez tłok gruby "na towarze," będzie ściśle równa pracy, wykonanej przez nas "na tłoku cienkim" (jako wykonana przez siłę 100 razy większą lecz zato na drodze 100 razy krótszej).

Uwaga. Siły, wywierane na wodę w prasie hidraulicznej, są zazwyczaj olbrzymie w porównaniu z ciężarami poszczególnych części masy wodnej; wobec tego mogliśmy rozpatrywać tę masę, jako wyjętą z pod wpływu ciężkości (po-

zbawioną ciężaru) i przyjąć, że ciśnienie hidrostatyczne jest w niej wszędzie jednakowe.

§ 5. **Ciecz ciężka.** W cieczy ciężkiej ciśnienie hidrostatyczne jest jednakowe w każdym miejscu jednej i tej samej płaszczyzny poziomej. Tak np. w wannie na głębokości stopy ciśnienie hidrostatyczne wody jest wszędzie jednakowe; podobnież jednakowe jest ciśninie hidrostatyczne na całem dnie wanny, o ile sama wanna nie jest przechylona.

W miarę posuwania się w głąb cieczy ciężkiej, ciśnienie hidrostatyczne wzrasta proporcyonalnie do głębokości (porównaj § 19): na głębokości 50 cm. ciśnienie hidrostatyczne w wannie jest 5 razy większe aniżeli na głębokości 10 cm. Liczebnie ciśnienie hidrostatyczne równa się ciężarowi pionowego słupa cieczy, ustawionego na jednostce pola tej właśnie płaszczyzny poziomej, która leży w danej głębokości, a górną swą podstawą sięgającego swobodnej powierzchni cieczy. W wannie na głębokości 50 centymetrów ciśnienie hidrostatyczne wynosi 50 gramów na cm^2. (w przypuszczeniu, że centymetr sześcienny wody waży gram, co, jak wiadomo, słuszne jest ściśle dla wody dystylowanej przy 4^0C). W oceanie na głęboko-

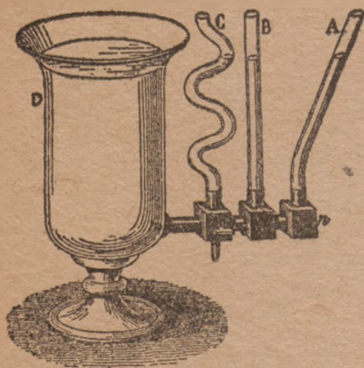


Fig. 3.

ści 1000 metrów ciśnienie hidrostatyczne przenosi 100 kilogramów na cm². (1000×100= 100000 gramów), woda bowiem morska jest cięższa od wody słodkiej. Można dowieść, że, jeżeli z powodu kształtu naczynia słup taki cieczy w rzeczywistości nie istnieje (fig. 3 A i C), to i w takim razie ciśnienie hidrostatyczne daje się obliczyć wedle tej samej zasady, tj. równa się tak samo ciężarowi pionowego słupa cieczy, któryby m o ż n a ustawić pomiędzy danem miejscem cieczy a poziomem jej powierzchni swobodnej.

Ta swobodna powierzchnia cieczy musi w całem naczyniu zlewać się z jedną i tą samą płaszczyzną poziomą. Gdyby tak nie było, gdyby w jednem miejscu powierzchni ciecz stała wyżej niż w jakiemś innem, to wówczas, przeprowadziwszy we wnętrzu cieczy dowolną płaszczyznę poziomą, mielibyśmy w pierwszem miejscu ciśnienie hidrostatyczne większe (słup cieczy wyższy) niźli w drugiem, a ta nierówność ciśnień wywołałaby natychmiast ruch cieczy od wyższego poziomu ku niższemu. Ponieważ ro-

zumowanie nasze jest niezależne od kształtu naczynia, przeto i w naczyniu, składającem się z kilku naczyń połączonych (fig. 3), wszystkie części swobodnej powierzchni cieczy muszą leżeć na jednym poziomie, innemi słowy, we wszystkich rurkach ciecz będzie stała równie wysoko.

§ 6. **Prawo Archimedesa.** Siła z którą ciecz ciężka usiłuje podnieść do góry zanurzone w niej ciało, równa się ciężarowi cieczy, wypchniętej przez ciało.

Prawo to jest bezpośredniem następstwem zwiększania się ciśnienia hidrostatycznego wraz z głębokością, wskutek czego ciśnienie całkowite, wywierane przez ciecz na dolną powierzchnię zanurzonego ciała (z dołu do góry), jest zawsze większe od ciśnienia całkowitego, wywieranego przez ciecz na górną powierzchnię tegoż ciała (z góry na dół). Przewaga pierwszego ciśnienia nad drugiem jest źródłem siły, która usiłuje podnieść ciało do góry. Można dowieść, że siła ta równa jest liczebnie ciężarowi wypchniętej przez ciało cieczy.

Jeżeli zawieszone na wadze ciało zrównoważymy ciężarkami, a następnie zanurzymy w podstawione naczynie z cieczą, to zobaczymy, że belka wagi przechyli się w stronę ciężarków: wskutek działania siły, usiłującej podnieść zanurzone ciało do góry, zachowuje się ono tak,

jak gdyby straciło na ciężarze dokładnie tyle, ile waży ciecz, przez nie wypchnięta. Łatwo to sprawdzić, obliczając ciężar, o który zmniejszyć trzeba obciążenie szalki, żeby doprowadzić belkę wagi do pierwotnego położenia.

§ 7. **O pływaniu ciał.** Zależnie od tego, czy ciężar ciała jest większy, czy też mniejszy od ciężaru wypchniętej przez nie cieczy, ciało to idzie na dno lub też pływa w równowadze. Ponieważ w tym ostatnim wypadku siła, podnosząca ciało do góry, winna równoważyć ściśle ciężar ciała, przeto zostaje zanurzona taka tylko część pływającego ciała, żeby ciecz, przez nią wypchnięta, ważyła tyle, co całe ciało.

Jeżeli ciężar ciała jest dokładnie równy ciężarowi wypchniętej przez nie cieczy, to ciało może unosić się w równowadze na dowolnym poziomie we wnętrzu cieczy.

§ 8. **Ciężar właściwy a gęstość.** Ciężarem właściwym pewnej substancyi nazywamy iloraz z ciężaru tej substancyi przez ciężar równej objętości wody przy 4°C (przy tej temperaturze woda jest najgęstsza). Widzimy więc, że ciężar właściwy, jako stosunek dwóch ciężarów, jest liczbą czystą, niemianowaną, a więc niezależną od wyboru jednostek. Ciężar właściwy platyny wynosi zawsze 21,5, ciężar właściwy złota 19,3, ołowiu 11,4, wosku 0,96, rtęci 13,596, wody 1, alkoholu 0,79, eteru 0,72, korka 0,24; znaczy to innemi słowy, że platyna cięższa jest

od wody 21,5 razy, złoto 19,3 razy, ołów 11,4 razy itd.

Gęstością pewnej jednorodnej substancyi jest liczba jednostek masy, zawartych w jednostce objętości tej substancyi. Jest to, jak widzimy, liczba mianowana, zależna od wyboru jednostek. Tak np. w układzie C.-G.-S. gęstość wody równa się 1 (t.j. równa się liczebnie ciężarowi właściwemu wody), ponieważ w jednym centymetrze sześciennym zawiera się jeden gram wody; ale w układzie Metr—Kilogram—Sekunda otrzymamy już dla gęstości wody liczbę inną: istotnie, ponieważ w metrze sześciennym wody zawiera się tysiąc kilogramów, przeto gęstość wody wyniesie podług określenia 1000. Łatwo jednak zauważyć, że ciężary właściwe ciał mają się do siebie, jak ich gęstości.

Jeden ze sposobów określania ciężaru właściwego polega na tem, że przez zważenie danego ciała w wodzie 4-stopniowej określamy poniesioną przez nie stratę na ciężarze, która, jak wiadomo, przedstawia ciężar wypchniętej wody. Dzieląc rzeczywisty ciężar ciała przez tę stratę, otrzymujemy podług określenia ciężar właściwy danego ciała.

§ 9. **O ciśnieniu powietrza.** Ze względu na wiele własności mechanicznych, powietrze (i wogóle każdy gaz) możemy uważać za ciecz (§ 1), albowiem z jednej strony poddaje się ono

z większą jeszcze łatwością niż woda każdej sile, usiłującej zmienić jego kształt (poruszając się, zmieniamy co chwila kształt masy powietrza, zawartej w pokoju, a jednak nie odczuwamy tego wcale), a z drugiej strony stawia opór siłom, usiłującym zmienić jego objętość. Co prawda, opór ten nie jest tak olbrzymi, jak to zachodziło u wody: żeby zmniejszyć objętość wody w sposób widoczny, trzebaby wywrzeć na nią siłę, o wiele przechodzącą siłę mięśni człowieka, tak dalece, iż w warunkach zwyczajnych można uważać, że woda jest zupełnie nieściśliwą (§ 19), gdy tymczasem ściśliwość powietrza jest stosunkowo znaczna.

Rozpatrując powietrze jako ciecz, możemy powiedzieć, że mieszkamy na dnie głębokiego oceanu powietrznego, którego powierzchnia leży daleko po nad wysokościami, dostępnemi dla aeronautów. W oceanie tym, podobnie jak w wannie lub w oceanie wodnym, ciśnienie hidrostatycze jest jednakowe w każdem miejscu jednej i tej samej płaszczyzny poziomej i wzrasta w miarę posuwania się wgłąb, licząc od powierzchni atmosery, tj. z naszego punktu widzenia w miarę posuwania się w górę. Ale w *sposobie* wzrastania ciśnienia hidrostatycznego zachodzi poważna różnica pomiędzy oceanem wodnym a oceanem powietrznym. Różnica ta polega na tem, że, wskutek niesłychanie małej ściśliwości wody, warstwy jej dolne nie

kurczą się prawie wcale pod ciężarem warstw górnych, tak iż woda oceanu posiada na wszelkiej głębokości gęstość jednakową, gdy tymczasem powietrze warstw dolnych kurczy się i to znacznie pod ciężarem warstw górnych, wskutek czego w miarę posuwania się w górę atmosfery napotykamy warstwy coraz to rzadsze. Ciśnienie hidrostatyczne w pewnem danem miejscu oceanu powietrznego mierzy się (§ 5) ciężarem pionowego słupa powietrza, stojącego na jednostce pola tej właśnie płaszczyzny poziomej, która przechodzi przez dane miejsce, a sięgającego "swobodnej powierzchni" powietrza, t.j. ostatnich krańców atmosfery. Otóż wobec tego, co mówiliśmy o wzrastaniu gęstości powietrza z głębokością oceanu powietrznego, łatwo zrozumiemy, że w miarę wznoszenia się w górę ciśnienie hidrostatyczne powietrza maleje *szybciej*, niżby malało w takim razie, gdyby w oceanie powietrznym gęstość była wszędzie jednakowa, jak to zachodzi w oceanie wodnym.

Ciśnienie hidrostatyczne oceanu powietrznego nosi nazwę ciśnienia atmosferycznego. Ciśnienie atmosferyczne jest więc jednakowe (porównaj § 10) w różnych miejscach, położonych na jednym i tym samym poziomie, ale maleje szybko w miarę wznoszenia się w górę.

§ 10. **Mierzenie ciśnienia atmosferycznego.** Ponieważ nie znamy ani wysokości pionowego

słupa powietrznego, sięgającego od danego poziomu aż do krańców atmosfery, ani gęstości, panującej w różnych warstwach tego słupa, przeto brak nam zupełnie danych do teoretycznego obliczenia wielkości ciśnienia atmosferycznego. Pomimo to możemy z największą łatwością i dokładnością określić doświadczalnie tę wielkość w każdem miejscu atmosfery, a to za pomocą ginialnego w swej prostocie przyrządu, zwanego barometrem.

Weźmy zamkniętą z jednego końca rurkę szklaną (fig. 4, B), mającą około metra długości, napełnijmy ją całkowicie rtęcią i, zatkawszy otwarty koniec wielkim palcem, przewróćmy rurkę dnem do góry, a następnie, nie odejmując palca, zanurzmy ją zatkanym końcem w naczynie z rtęcią. Gdy odejmiemy palec (pod rtęcią), słup rtęci w rurce osunie się nieco i stanie nieruchomo na wysokości około ¾ metra (licząc od poziomu cieczy w miseczce), pozostawiając nad sobą niczem nie wypełnioną przestrzeń — próżnię Torricellego, zwaną tak od nazwiska uczonego Włocha, który pierwszy wykonał to doświadczenie.



Fig. 4.

Przyczyna takiego zachowywania się rtęci w rurce jest następująca. Ciśnienie atmosferycz-

ne, działając z zewnątrz (z góry na dół) na rtęć w miseczce, usiłuje wpędzić ją do rurki; z drugiej strony, słup rtęci wskutek ciężaru swego usiłuje osunąć się na dół i wywiera za pośrednictwem rtęci miseczki ciśnienie hidrostatyczne (z dołu do góry) na powietrze atmosfery. Równowaga następuje, tj. słup rtęci zatrzymuje się wtedy, gdy ciśnienia hidrostatyczne rtęci i powietrza zrównają się ze sobą: jeżeli więc zmierzymy jedno z tych ciśnień, to tem samem znajdujemy i wielkość drugiego. Otóż ciśnienie hidrostatyczne rtęci obliczyć możemy z łatwością; jest ono liczebnie równe ciężarowi pionowego słupa rtęci, stojącego na centymetrze kwadratowym powierzchni rtęci w miseczce i sięgającego u góry poziomu rtęci w rurce. Jeżeli wysokość tego słupa wynosi np. 76cm., to ciężar jego równa się $76 \times 13{,}596 = 1033$ gramom (cm^3 rtęci waży 13,596 gr.). Tyleż wynosi ciężar pionowego słupa powietrza, stojącego na centymetrze kwadratowym powierzchni rtęci w miseczce i sięgającego u góry najdalszych krańców atmosfery.

Wysokość 76 cm. jest przeciętną wysokością, na której zatrzymuje się słup rtęci w opisanem przez nas doświadczeniu Torricellego, jeżeli będziemy je wykonywali na poziomie oceanu. W Warszawie, wzniesionej o 100 metrów nad poziomem morza, przeciętna wysokość słupa rtęci w barometrze — każdy barometr jest w

gruncie rzeczy taką opisaną przez nas rurką Torricellego — wynosi 75 cm.; na szczycie Chimborasso (8000 m. nad poziomem oceanu) słup ten nie dosięga 40 cm. Prócz tego, zależnie od zmian przypadkowych, zachodzących w gęstości różnych warstw atmosfery, wysokość barometryczna ulega niezbyt znacznym, lecz ciągłym wahaniom.

Ciśnienie, wynoszące 1033 gramy (1033×981 dyn) na centymetr kwadratowy, nazywamy ciśnieniem jednej atmosfery, chociażby nie było ono wywierane przez rzeczywistą atmosferę. Ciśnienie podwójnej, potrójnej wielkości nazywamy ciśnieniem dwóch, trzech atmosfer itd.

§ 11. **Ciało, zanurzone w powietrzu.** Na każde ciało, zanurzone w powietrzu, działa siła, usiłująca podnieść je do góry. Tak samo jak w wypadku zwykłych cieczy, źródłem tej siły jest przewaga ciśnień, wywieranych z dołu do góry na dolną powierzchnię ciała, nad ciśnieniami, wywieranemi z góry na dół na górną powierzchię ciała. Pozornie każde ciało waży w powietrzu mniej, niż w próżni, mianowicie o tyle mniej, ile waży powietrze, którego miejsce dane ciało zajmuje.

Jeżeli dane ciało waży mniej od powietrza, którego miejsce zajmuje, to wówczas siła podnosząca jest większa od ciężaru ciała, i ciało dąży do wypłynięcia na powierzchnię oceanu powietrznego (mówiąc ściślej do wzniesienia

się na taką wysokość, na której ciężar wypchniętego powietrza zrówna się z ciężarem ciała). Takiem ciałem jest np. balon, napełniony gazem oświetlającym, który jest lżejszy od powietrza. Wznoszenie się balonu, puszczonego z powierzchni ziemi, jest zjawiskiem analogicznem do wypływania korka, puszczonego z dna wanny.

§ 12. **Pompa ssąca.** To samo ciśnienie atmosferyczne, które w rurce Torricellego równoważy słup rtęci wysoki na 76 cm., zrównoważy w niej przeszło 13 razy wyższy słup wody. Przekonał się o tem Pascal, wykonywając doświadczenie Torricellego z rurą, długą na kilkanaście metrów, napełnioną winem czerwonem, którego ciężar właściwy nie różni się prawie od ciężaru właściwego wody: słup wina w rurze zatrzymał się na wysokości przeszło 10 metrów, licząc od poziomu naczynia, w które zanurzono otwarty koniec rury.

Na tym fakcie, że ciśnienie atmosferyczne zdolne jest zrównoważyć ciśnienie słupa wody, wysokiego na 10 metrów, opiera się budowa pompy ssącej. Przyrząd ten składa się z zanurzonej w wodę zbiornika rury R oraz z walca C, oddzielonego od niej klapą L; w walcu C chodzi tłok T, przyczem klapa K zostaje za-

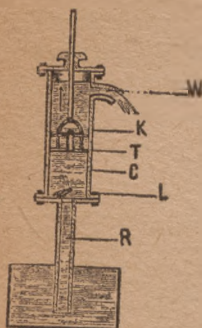


Fig. 5

mknięta, robimy pod nim miejsce dla wody, która, naciskana przez ciśnienie atmosferyczne, działające na swobodną powierzchnię w zbiorniku, otwiera sobie klapę L i wchodzi do walca C, podążając w górę za tłokiem. Gdy, doprowadziwszy tłok do górnej pokrywy walca, zaczniemy go opuszczać na dół, wówczas ciśnienie wody, zawartej w walcu pod tłokiem, jednocześnie zamyka klapę L i otwiera klapę K, przez którą woda przedostaje się na drugą stronę tłoka. Przy ponownem podnoszeniu tłoka klapa K zamyka się a woda, zebrana nad tłokiem, zostaje wyrzucona nazewnątrz boczną rurą W.

Ponieważ ciśnienie atmosferyczne przeciętnie nie może utrzymać słupa wody, wyższego nad 10 metrów, przeto w wypadku rury R, posiadającej długość większą, woda nie dosięgnie tłoka, lecz zatrzyma się w pewnej odległości pod nim, tak iż pomiędzy jej poziomem w rurze a dolną powierzchnią tłoka utworzy się próżnia, odpowiadająca próżni w rurce Torricellego. Gdybyśmy mieli studnię, napełnioną rtęcią i chcieli na niej urządzić pompę, to taka pompa mogłaby podnieść rtęć zaledwie na wysokość ¾ metra.

§ 13. **Machina pneumatyczna.** Dopóki

wnętrze próżnego naczynia połączone jest chociażby najmniejszym otworem z atmosferą zewętrzną, dopóty powietrze, zawarte w tem naczyniu, stanowi część oceanu powietrznego i posiada w każdem miejscu ciśnienie (hidrostatyczne) takie, jakie odpowiada danemu poziomowi tego oceanu. Tak np. wewnątrz sali wysokiej na 25 metrów, której podłoga wzniesiona jest o 100 metrów nad poziom oceanu, ciśnienie atmosferyczne tuż przy podłodze będzie równe ciśnieniu atmosferycznemu, które panuje zewnątrz na poziomie 100 metrów, zaś ciśnienie w bliskości sufitu — ciśnieniu, które panuje zewnątrz na poziomie 125 metrów. Różnica pomiędzy ciśnieniami na 100 i na 125 metrach wysokości jest niezmiernie drobna, tak iż, praktycznie biorąc, ciśnienie w całej sali można uważać za jednakowe; z tem większą słusznością możemy mówić o jednem tylko ciśnieniu we wnętrzu takich drobnych "zatok" oceanu powietrznego, jakiemi są np. wnętrze otwartej butelki, szuflady stolika itp.

Całkiem inaczej mają się rzeczy, gdy chodzi o powietrze, odcięte zupełnie od atmosfery zewnętrznej, np. o powietrze, zawarte wewnątrz szczelnie zakorkowanej butelki. Ciśnienie takiego powietrza jest niezależne od ciśnienia, panującego w danem miejscu oceanu powietrznego.. Zmniejszając ilość powietrza, zawartego w zamkniętej przestrzeni, możemy zmniej-

szyć jego ciśnienie i odwrotnie, zwiększając tę ilość, zwiększamy ciśnienie. Do usuwania powietrza z naczyń zamkniętych służy przyrząd,

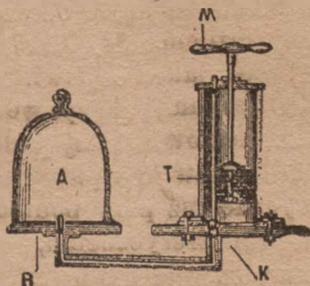


Fig. 6.

zwany machiną pneumatyczną. W najprostszej swej postaci przyrząd ten składa się ze szklanego walca z tłokiem T (fig. 6), połączonego za pośrednictwem rurki z wnętrzem zbiornika, w którym zamierzamy rozrzedzić powietrze: zbiornikiem tym bywa najczęściej szklany klosz A o brzegach przystających do gładkiej tafli P. W tłoku T są dwa otwory: jeden, zamykany klapą, otwierającą się do góry, i drugi, przez który przechodzi z mocnem tarciem pionowy pręt, zakończony szpuntem K, przeznaczonym do zatykania rurki v. Podnosząc tłok do góry, odtykamy tę rurkę; część powietrza z klosza A przechodzi do wytwarzającej się pod tłokiem próżni, wskutek czego powietrze w A rozrzedza się. Opuszczając następnie tłok na dół, zatykamy przedewszystkiem rurkę

v szpuntem K i odcinamy tym sposobem rozrzedzone powietrze klosza A od wnętrza walca, poczem, w miarę dalszego opuszczania się tłoka T, ściśnięte pod nim powietrze otwiera sobie klapę i uchodzi na zewnątrz. Łatwo zrozumieć, że każde następne podniesienie tłoka w walcu spowoduje ujście nowej ilości powietrza z pod klosza, i że, im dłużej działać będzie machina, tym otrzymane rozrzedzenie będzie zupełniejsze.

§ 14. **Gęstość powietrza** można określić, ważąc szklany balon naprzód z powietrzem a następnie po usunięciu zeń powietrza. Dzieląc różnicę mas przez objętość balonu, otrzymamy gęstość powietrza, które zawierało się w balonie Oczywiście, gęstość ta musi zależeć od ciśnienia, które panuje w danem miejscu oceanu powietrznego podczas ważenia balonu. Albowiem,im to ciśnienie jest większe, tem większa masa powietrza mieści się w balonie. Prócz tego gęstość powietrza zależy jeszcze od jego temperatury (cz. III). Przekonano się, że w tak zwanych warunkach normalnych, tj. pod ciśnieniem jednej atmosfery i przy temperaturze 0^0 C, centymetr sześcinny powietrza posiada masę, równą 0,001293 gr. A zatem w układzie C.-G.-S. gęstość powietrza, znajdującego się w warunkach normalnych, wyraża się li-

czbą 0,001293 czyli $\frac{1}{773}$ Litr (kwarta) powietrza waży w tych warunkach 1,293 gr.

§ 15. **Prawo Torricellego.** Jeżeli przebić otwór w ścianie naczynia z cieczą (fig. 7), to przez otwór ten ciecz wypływać będzie z prędkością taką, jaką posiada ciało, spadające swobodnie, gdy przebiegnie drogę, równą odległości pomiędzy poziomem cieczy w A a poziomem otworu a. Tak np. wiemy, że po przebieżeniu 5 metrów ciało, spadające swobodnie, posiada

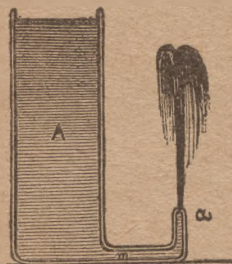


Fig. 7.

prędkość (w liczbie okrągłej) 10 metrów na sekundę; jeżeli więc poziom cieczy w A położony jest o 5 metrów wyżej, aniżeli punkt a, to ciecz wypływa z a z prędkością 10 metrów na sekundę.

Stąd wynika, że jeżeli strumień cieczy zostanie skierowany pionowo do góry, jak to widzimy na fig. 7, to powinien on wznieść się do tej

samej wysokości, na której znajduje się swobodna powierzchnia cieczy (cz. I). W rzeczywistości wysokość wytryskującego słupa cieczy bywa nieco mniejsza, a to wskutek działania oporu powietrza i tarcia samej cieczy o brzegi otworu. Jeżeli skierujemy strumień cieczy ukośnie względem pionu (z imbryka, z polewaczki, z węża strażackiego itp.), to wskutek jednoczesnego działania prędkości początkowej i siły ciężkości strumień ten zakreśli linię krzywą (cz. I), której kształt zależy od wielkości i kierunku prędkości początkowej, tj. prędkości, z którą ciecz wypływa z otworu.

§ 16. **Energia mas wodnych.**- Zbiornik wody, umieszczony na poziomie wyższym, z którego może ona spadać na poziom niższy, przedstawia zasób energii potencyalnej, który możemy zamienić na pracę pożyteczną, posługując się pewnymi przyrządami pomocniczymi.

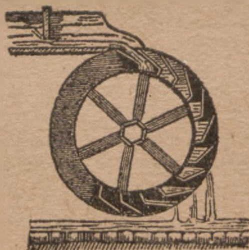


Fig. 8.

Jednym z takim przyrządów jest koło hidrauliczne, przedstawione na fig. 8. Woda,

spływająca ze zbiornika, napełnia skrzynki, znajdujące się w górnej części obwodu, wskutek czego następuje obrót koła w stronę większego obciążenia. Przy tym obrocie skrzynki w miarę przechylania się swego tracą wodę stopniowo, tak iż znalazłszy się na dole, nie zawierają już jej wcale i powracają pod strumień w stanie próżnym. Takie obracające się koło możemy połączyć z jakąkolwiek maszyną roboczą, jako to: młynem, tartakiem itd.

Masa wody, płynącej z pewną prędkością, przedstawia zasób energii kinetycznej, którą możemy przetworzyć na pracę użyteczną np. zapomocą koła hidraulicznego, przedsta-

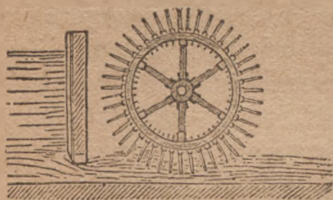


Fig. 9.

wionego na fig. 9. Woda działa tutaj nie ciężarem swoim, jak w wypadku poprzednim, lecz uderzeniem, wywieranym na łopatki koła.



II.

O SPRĘŻYSTOŚCI.

§ 17. **Sprężystością** nazywamy zdolność ciał do uwalniania się od odkształcenia, tj. od zmiany objętości albo kształtu, skoro tylko usuniemy siły zewnętrzne, które wywołały to odkształcenie. Rozciągnięta taśma gumowa powraca do pierwotnej długości, skoro uwolnimy ją od ciągnienia, jest więc sprężysta; ściśnięta w garści gąbka rozpręża się skoro ją uwolnimy od ucisku — jest więc sprężysta.

Widzieliśmy, że ciecze i gazy nie stawiają oporu siłom, usiłującym zmienić ich kształt, o ile zmianie takiej nie towarzyszy zmiana objętości. Można powiedzieć, że są to ciała, które posiadają jedynie sprężystość objętościową lecz nie posiadają sprężystości postaciowej, gdy tymczasem ciała stałe posiadają oba te rodzaje sprężystości.

§ 18. **Sprężystość gazu.** Ciecz właściwa taka, jak woda, rtęć, alkohol itd., zajmuje w zaofiarowanej sobie przestrzeni — byleby przestrzeń ta była dostatecznie duża — pewną określoną objętość, niezależną od wymiarów tej

przestrzeni, pozostawiając resztę niezajętą (pół szklanki wody, ¼ butelki spirytusu itp.). Gaz, przeciwnie, posiada dążność do nieograniczonego rozszerzania się, do wypełniania sobą jaknajwiększej przestrzeni. Gaz, który w dążności swojej do rozbiegania się na wszystkie strony napotyka na przeszkodę, np. na sztywne ścianki naczynia, wywiera na tę przeszkodę ciśnienie tem większe, im sam jest gęstszy, tj. im mniejszą w stosunku do swej masy zajmuje objętość. I odwrotnie, im większe ciśnienie wywrzemy na gaz, zamknięty w naczyniu, obciążając np. ciężarkami tłok ruchomy, pod którym zamknięta jest pewna ilość gazu, tem bardziej zmniejszy się objętość, zajmowana przez tę ilość gazu. Objętość, zajmowana przez pewną masę gazu, jest zawsze odwrotnie proporcyonalna do ciśniena, pod którem się ten gaz znaj duje (prawo Boyle'a - Mariotte'a). Innemi słowy, jeżeli pewna określona masa powietrza, np. funt, kilogram, łut, gram, znajdzie się w pewnym danym przypadku pod ciśnieniem dwa, trzy, pięć, dziesięć sto razy większym, aniżeli w jakimś innym przypadku, to zajmie objętość 2, 3, 5, 10, 100 razy mniejszą (w przypuszczeniu że w obu wypadkach temperatura gazu jest jedna i ta sama).


Fig. 10.

Z bezpośrednim zastosowaniem prawa B o y l e ' a - Mariotte'a spotykamy się w manometrze rtęciowym zamkniętym. Jest to (figura 10) mocna rurka szklana, napełniona powietrzem lub innym gazem, u góry zamknięta, a dolnym otwartym końcem mocno osadzona na szyjce stalowego naczynia i zanurzona w rtęć, wypełniającą to naczynie. Z naczynia tego boczna rura prowadzi do zbiornika z parą lub cieczą, np. do kotła maszyny parowej, lub do rezerwoaru z wodą w prasie hidraulicznej. Ciśnienie, panujące w zbiorniku, za pośrednictwem rtęci udziela się dołem słupowi gazu, zamkniętego w naszej rurce i ściska słup ten tym mocniej, im samo jest silniejsze. Przypuśćmy, że gdy w zbiorniku panuje ciśnienie jednej atmosfery, natenczas długość słupka gazowego, zamkniętego w rurce manometrycznej, wynosi 36 cm. Jeżeli następnie w ciągu jakiegokolwiek doświadczenia zobaczymy, że słupek ten skrócił się do 18, 12, 9, 3 centymetrów, czyli że objętość, zajmowana przez powietrze, zmniejszyła się do ½, 1|3, ¼, 1|12 części objętości pierwotnej, to, opierając się na prawie Boyle'a-Mariotte'a, wywnioskujemy, że ciśnienie w zbiorniku równa się dwóm, trzem, czterem, dwunastu atmosferom.

§ 19. **Sprężystość cieczy.** W przeciwstawieniu do znacznej ściśliwości gazów ściśliwość cieczy właściwych jest niezmiernie mała, tak

dalece, że w warunkach zwyczajnych nie daje się wcale stwierdzić. Za pomocą bardzo subtelnych doświadczeń przekonano się, że ze zwiększeniem się ciśnienia o jedną atmosferę objętość wody zmniejsza się zaledwie o 50 milionowych części objętości pierwotnej, objętość rtęci zaledwie o 3 milionowe części objętości pierwotnej; to znaczy, że masa wody, która pod ciśnieniem jednej atmosfery zajmuje objętość, równą jednemu litrowi, zajmie pod ciśnieniem dwóch atmosfer objętość zaledwie o 50 milimetrów sześciennych mniejszą.

§ 20. **Sprężystość ciał stałych.** W przeciwieństwie do cieczy i gazów, które posiadają jedynie sprężystość objętościową, ciała stałe ujawniają oba rodzaje sprężystości, tj. zarówno sprężystość objętościową, jak i sprężystość postaciową.

Ciało stałe, poddane ciśnieniu ze wszech stron jednakowemu, ujawnia sprężystość objętościową na podobieństwo gazu lub cieczy. Ciśnienie takie wywrzeć można na ciało stałe, zanurzając je np. w wodzie i poddając tę wodę silnemu ciśnieniu za pomocą prasy hidraulicznej (§ 4). Doświadczenie uczy, że jeżeli dane ciało stałe jest jednolite (szkło, metale, kryształy), to ściśliwość jego jest jeszcze mniejsza od ściśliwości cieczy. Natomiast ciała stałe o budowie gąbczastej mogą ujawniać znaczną ściśliwość,

chociażby pory ich były niedostrzegalne (kauczuk).

Istnieją rozmaite rodzaje sprężystości postaciowej. Drut metalowy, obciążony gwichtem u dolnego końca, wydłuża się, zwężając się jednocześnie w przekroju poprzecznym. I odwrotnie, słupek kauczukowy, przyciśnięty ciężarkiem, umieszczonym na górnej podstawie, skraca się, rozszerzając się jednocześnie w przekroju poprzecznym. Belka, umocowana jednym końcem w ścianie, zgina się, gdy do drugiego końca przyczepimy ciężar. Pręt, którego jeden koniec został unieruchomiony w osadzie, skręca się, gdy, uchwyciwszy za drugi koniec obcęgami, zaczniemy go obracać dokoła osi pręta itd. itd.

§ 21. **O uderzeniu kul sprężystych.** Czas trwania uderzenia kul sprężystych można podzielić na dwa okresy.

W pierwszym okresie spotkania następuje zawsze spłaszczenie obu ciał dokoła miejsca zetknięcia: w wypadku kul, biegnących w kierunkach przeciwnych, spłaszczenie to następuje wskutek tego, że każda z kul usiłuje na mocy bezwładności poruszać się w dalszym ciągu w kierunku pierwotnym; w wypadku kul, z których jedna dopędza drugą, spłaszczenie następuje wskutek tego, że jedna z kul, mianowicie popychająca, na mocy bezwładności usiłuje poruszać się dalej w pierwotnym swym kierunku,

a druga popychana, stawia opór bezwładny wszelkiemu zwiększeniu swojej prędkości. W ciągu drugiego okresu spotkania części spłaszczone kul powracają do stanu normalnego, i podczas tego powrotu każda z kul usiłuje oddalić się od swej sąsiadki. Ostateczny wynik tych wszystkich działań wzajemnym zależy zarówno od prędkości posiadanych przez kule w pierwszej chwili spotkania, jak i od mas tych kul. Jeżeli masy kul są jednakowe, to wynikiem spotkania jest wymiana prędkości pomiędzy kulami: kula Nr. 1 nabiera po uderzeniu prędkości, którą przed uderzeniem posiadała kula Nr. 2, zaś kula Nr. 2 porusza się po uderzeniu z prędkością, z którą poruszała się przed uderzeniem kula Nr. 1. Jeżeli kula Nr. 1 znajdowała się przed uderzeniem w spoczynku, to po uderzeniu znajdzie się w spoczynku kula Nr. 2.

Jeżeli kula sprężysta pada na płytę prostopadle, to odbija się od niej również prostopadle; jeżeli pada ukośnie, to po uderzeniu odskakuje od płyty również ukośnie, lecz już po drugiej stronie pionu, wystawionego w punkcie zetknięcia. Kąt, który kierunek kuli odskakującej tworzy z tym pionem, równa się kątowi, który tworzy z nim kierunek kuli padającej, przyczem oba te kierunki leżą w jednej płaszczyźnie pionowej.

§ 22. **Teorya kinetyczna materyi.** W teoryi kinetycznej g a z ó w wyobrażamy sobie każdą

masę gazu, jako składającą się z niezmiernie małych cząstek, poruszających się prostoliniowo w najrozmaitszych kierunkach, przyczem w każdym dowolnym kierunku biegnie przeciętnie jedna i ta sama liczba cząstek. Liczba takich cząstek gazu czyli m o l e k u l, znajdujących się jednocześnie w obrębie jednego centymetra sześciennęgo, wynosiłaby według założeń tej hipotezy miliony bilionów. Rozmiary samych cząstek są tak małe, że, gdyby wszystkie molekuły, zebrane z pewnej danej przestrzeni, ułożyć obok siebie tak, żeby dotykały się wzajemnie, to utworzona tym sposobem objętość byłaby znikomo mała w porównaniu z daną przestrzenią. Każda taka cząstka biegnie prostolinjowo dopóty, dopóki nie napotka na swej drodze bądź ściany naczynia, bądź innej molekuły: wtedy następuje uderzenie, po którem molekuły odskakują od siebie lub od ścianki na podobieństwo kul sprężystych. Taki nieustanny ruch cząsteczek wzdłuż linii prostych tłómaczy posiadaną przez gazy własność rozbiegania się na wszystkie strony, a szereg wciąż powtarzających się uderzeń o ścianki naczynia stanowi właśnie istotę ciśnienia, wywieranego przez gaz na te ścianki. W tłómaczeniu tego ciśnienia teorya kinetyczna nie ogranicza się tą uwagą ogólnikową. Jeżeli przypuścimy, że uderzenia pomiędzy oddzielnemi cząsteczkami nie zdarzają się wcale, czyli, co na jedno wyjdzie, że

cząsteczki mimo niesłychaną swą liczbę są jednak niezmiernie rzadko rozsiane w danej przestrzeni, to względnie proste obliczenie prowadzi do wniosku, że ciśnienie gazu musi być odwrotnie proporcyonalne do jego objętości;innemi słowy, na drodze czysto teoretycznej dochodzimy do uzasadnienia znanego nam już prawa Boyle'a-Mariotte'a (§ 18).

Hipoteza kinetyczna wyjaśnia więc w sposób prostoty i zarazem ścisły zjawisko prężności gazów. Ale rola jej nie kończy się na tem. Zestawiając oparte na niej obliczenia z tem, co daje doświadczenie, przekonano się, że w ogromnej liczbie zjawisk gazy zachowują się tak jak gdyby rzeczywiście składały się z niesłychanie małych kuleczek sprężystych. Ruchy tych ciałek stosują się ściśle do ogólnych praw mechaniki, tak iż wedle słynnego powiedzenia Laplace'a "droga, którą zakreśla w przestrzeni cząstka gazu, jest równie określona, jak orbita planety i niema pomiędzy niemi innej różnicy nad tę, która wynika z niezupełności wiedzy naszej." Nie należy jednak wyobrazić sobie, że nauka stwierdziła faktycznie istnienie owych rozbieganych kuleczek. Jakkolwiek płodną okazała się teorya kinetyczna gazów, jakkolwiek znakomicie ułatwia ona zrozumienie zjawisk, a nawet, umiejętnie użyta, prowadzi do przepowiadania faktów przedtem nieznanych, niemniej przeto jest to tylko przypuszczenie, mniej

lub więcej prawdopodobne, które może być, ale może i wcale nie być w zgodzie z tem, co rzeczywiście dzieje się w naturze.

Wiadomo, że gazy można skraplać, czyli przeprowadzić w stan ciekły, i że ciecze dają się z kolei zamieniać na ciała stałe. Na każdym kroku obserwujemy zamianę pary wodnej na wodę ciekłą i wody ciekłej na lód i odwrotnie — powstawanie wody ciekłej z lodu, pary z wody ciekłej itd. Jeżeli przyjąć, że w stanie gazowym pewne dane ciało składa się z owych sprężystych kuleczek, to staje się rzeczą prawdopodobną, że te same molekuły istnieją w danem ciele i w dwóch innych jego stanach, tj. w stanie ciekłym i w stanie stałym. Przyjęcie teoryi kinetycznej gazów prowadzi nieuchronnie do utworzenia teoryi kinetycznej materyi wogóle, tj. teoryi, która różne własności materyi usiłuje wytłómaczyć ruchem molekuł i działaniem sił, czynnych pomiędzy temi molekułami. Własności cieczy i ciał stałych, tak odmienne od własności gazów, teorya kinetyczna tłómaczy tem, że w pierwszej kategoryi ciał odległości wzajemne cząsteczek są stosunkowo małe, a to umożliwia występowanie takich sił, które nie mogą ujawnić się w gazach, gdzie odległości pomiędzy cząsteczkami są olbrzymie. Wobec tego już na pierwszy rzut oka jest rzeczą widoczną, że wszystkie obliczenia teoryi kinetycznej cieczy i ciał stałych muszą być nieskończenie

zawilsze od obliczeń teoryi kinetycznej gazów. To też w porównaniu z ostatnią, pierwsza jest zaledwie naszkicowana.

§ 23. **O siłach molekularnych. — Włoskowatość, dyfuzya, lepkość.** W jakikolwiek sposób zechcemy wyobrażać sobie budowę wewnętrzną ciał przyrody, w każdym razie zmuszeni jesteśmy przyjąć, że w wielu wypadkach pomiędzy cząstkami ciał czynne są siły przyciągające — tak zwane siły molekularne czyli międzycząsteczkowe. Dowodzi tego obserwacya najprostszych zjawisk. Kropla wody, wisząca pod kranem samowaru, nie mogłaby się utrzymać w tem położeniu, lecz musiałaby spaść na ziemię, jak każde ciało ciężkie, gdyby z jednej strony cząstki wody nie były przyciągane przez cząstki mosiądzu i gdyby z drugiej strony oddzielne cząstki samej kropli nie przyciągały się wzajemnie. Podobnież, gdyby nie siły przyciągające międzycząsteczkowe, to każde ciało stałe, wzięte w rękę, natychmiast musiałoby rozłamać się na dwoje, albowiem część jego, nie podparta bezpośrednio, musiałaby spaść na ziemię wskutek działania siły ciężkości. Spostrzegamy istotnie zjawisko takiego łamania się na ciałach bardzo kruchych, t. j. takich, w których przyciąganie międzycząsteczkowe jest względnie słabe, np. drzewo przegniłe, ciasto kruche.

Badania zjawisk, w których główną rolę grają siły międzycząsteczkowe, należy do naj-

trudniejszych zadań fizyki. Ograniczymy się tutaj do wymienienia kilku kategoryj tych zjawisk.

Zjawiska włoskowatości, których nazwa pochodzi stąd, że występują one najwyraźniej w rurkach o bardzo małej średnicy (cienkich jak włos), w zasadzie mają swe źródło w istnieniu tak zwanego napięcia powierzchniowego. Doświadczenie stwierdza, że bardzo cienka warstewka cieczy, taka np. jak ta, z której zrobiona jest bańka mydlana, zachowuje się tak, jak napięta błona kauczukowa, tj. stale usiłuje skurczyć się, zmniejszyć swą powierzchnię. Wyrażamy ten fakt, mówiąc, że na powierzchnię cieczy działa napięcie powierzchniowe, a zachowywanie się cieczy przypisujemy działaniu sił molekularnych, czynnych na granicy pomiędzy daną cieczą a powietrzem (lub inną cieczą) w obrębie dwóch niesłychanie cienkich warstewek, z których jedna należy do jednego z dwóch stykających się ze sobą ciał, np. do wody, a druga do drugiego, np. do powietrza.

Jednym z objawów istnienia napięcia powierzchniowego jest wznoszenie się niektórych cieczy w cienkich rurkach ponad poziom otaczający i osuwanie się innych cieczy poniżej poziomu. Do tej samej kategoryi należy znane każdemu zjawisko podnoszenia się wody tuż przy



Fig. 11



Fig. 12

brzegach szklanki, wskutek czego powierzchnia wody tworzy m e n i s k wklęsły. Rtęć daje w szklance menisk wypukły. Na załączonych figurach przedstawione jest zachowywanie się wody (fig. 11) i rtęci (fig. 12) w rurkach szklanych.

D y f u z y a polega na mieszaniu się, czyli przenikaniu się wzajemnem dwóch ciał niezależnie od działania sił zewnętrznych. Jeżeli nad balonem szklanym, zawierającym zwykłe powietrze, umieścimy balon, napełniony gazem oświetlającym i, połączywszy te naczynia, pozostawimy je w spokoju, to już po kilku minutach znajdziemy w balonie dolnym domieszkę gazu oświetlającego, zaś w balonie górnym domieszkę powietrza, pomimo, że gaz oświetlający jest lżejszy od powietrza, że więc ciężkość nie może tu być pobudką do mieszania się gazów.

Całkiem podobnie, tylko znacznie wolniej, odbywa się dyfuzya cieczy. Jeżeli do szklanki z mocno ocukrzoną wodą nalejemy esencyi her-

bacianej, to przy zachowaniu pewnych ostrożności możemy otrzymać z początku bardzo wyraźną granicę pomiędzy dwoma płynami. Jednakże granica ta nie da się utrzymać przez czas dłuższy; pomimo największego spokoju cząsteczki wody będą przenikały stopniowo do warstwy esencyi, i odwrotnie, cząsteczki esencyi będą dyfudowały do warstwy wody, a proces ten wymiany cząsteczek trwać będzie dopóty, dopóki nie nastąpi jaknajdokładniejsze zmięszanie się obu płynów.

Doświadczenia, ogłoszone w roku ubiegłym przez Anglika Roberta-Austena,zdają się przemawiać za tem, że i ciała stałe mogą dyfudować czyli przenikać się wzajemnie, aczkolwiek sprawa ta odbywa się niesłychanie powoli. Austen przyłożył kawałek złota do kawałka ołowiu i, potrzymawszy je razem przez czas dłuższy (4 lata), pokroił następnie na plasterki i plasterki te poddał analizie chemicznej. Otóż analiza ta wykryła obecność złota nawet w takich plasterkach ołowiu, które były oddalone o parę milimetrów od powierzchni zetknięcia ze złotem.

Od dyfuzyi wolnej, tj. dyfuzyi ciał,znajdujących się w bezpośrednim zetknięciu, odróżniamy tak zwaną osmoze, tj. dyfuzyę poprzez błonki mniej lub więcej porowate. Niepozorne to zjawisko stało się ostatnimi czasy punktem

wyjścia dla niezmiernie ważnych badań nad siłami molekularnemi.

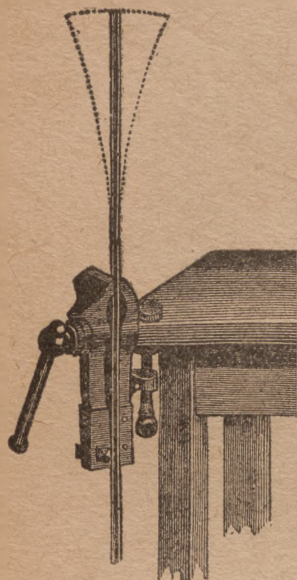
L e p k o ś c i ą albo t a r c i e m w e w n ę t r z n e m cieczy nazywamy tę własność cieczy, która sprawia, że skoro poruszymy jedną część jej masy, natenczas stopniowo poruszone zostaną i pozostałe części. Tak np. każdy z nas miał sposobność zauważyć, że dość jest zacząć mieszać górną warstwę herbaty w szklance, żeby po niedługim czasie zaczęły wirować proszki, znajdujące się na dnie szklanki, zdradzając tem samem ruch dolnych warstw płynu. Warstwy górne pociągają tu za sobą warstwy dolne wskutek pewnego rodzaju tarcia. To samo tarcie powoduje szybki powrót do spoczynku cieczy rozkołysanych, przyczem energja kinetyczna mas wodnych zamienia się na ciepło zupełnie tak samo, jak to się zdarza przy tarciu ciał stałych.



III.

O GŁOSIE.

§ 24. **Źródło głosu.** Doświadczenie uczy, że **źródłem głosu jest** zawsze ruch drgający **ciała** sprężystego. W ruchu takim ciało, wyprowadzone z położenia równowagi za sprawą siły zewnętrznej, np. przez uderzenie, ucisk, po**tarcie, i następnie** pozostawione samemu sobie, zaczyna wahać się, wychylając się to w jedną, to w drugą stronę, a drgania te trwają dopóty, dopóki ich nie zniweczy tarcie lub inne opory. Takie wahnięcia wykonywa np. pręt stalowy, zaciśnięty w śrubsztaku (fig. 13), gdy, odciągnąwszy na bok jego koniec, puścimy go swobodnie: jeżeli wahnięcia te odbywają się dostatecznie szybko, to słychać głos. Taki sam ruch drgający, polegający na wychylaniu się kolej-


Fig. 13

nem to w jedną to w drugą stronę z położenia równowagi wykonywa każde ciało dźwięczące. W niektórych razach drgania te możemy oglądać bezpośrednio np. w znanem doświadczeniu z mocno napiętym sznurkiem; w innych wypadkach łatwo odczuć je dotykiem, np. drgania dzwonu. Jeżeli nie będziemy ponawiali działań, wyprowadzających ciało z równowagi (uderzenia, ucisku, pocierania), to drgania zaczynają słabnąć, aż wreszcie zamierają zupełnie, a jednocześnie z niemi słabnie i wreszcie zamiera głos, wydawany przez dane ciało.

§ 25. **Wahadło.** Bezpośrednie badanie ruchów drgających nastręcza częstokroć wielkie trudności, i to zarówno pod względem teoretycznym, jak i pod względem doświadczalnym: pod względem teoretycznym — z powodu że nie posiadamy dokładnej znajomości sił sprężystych, które wywołują drgania, pod wzglę-

dem doświadczalnym z powodu olbrzymiej nieraz szybkości drgań tudzież drobnych bardzo rozmiarów wychyleń. Istnieje atoli rodzaj ruchu, w którym z jednej strony odnajdujemy cechy zasadnicze, wspólne wszystkim ruchom drgającym, a który z drugiej strony poddaje się z łatwością jaknajdokładniejszemu badaniu, odbywa się bowiem względnie powoli, wychylenia są w nim znaczne, a siła wywołująca jest nam dobrze znana. Ruchem tym, na którego przykładzie możemy zapoznać się z zasadą ruchu drgającego wogóle, jest ruch wahadła, kołyszącego się za sprawą siły ciężkości.



Fig. 14

Zawieśmy kulkę ołowianą na nitce. W położeniu równowagi (fig. 14, 1) nitka posiada, jak wiadomo, kierunek pionowy. W położeniu tem ciężar kulki, będący siłą, działającą zawsze pionowo z góry na dół, równoważy się z siłą napięcia nici, która skierowana jest zawsze wzdłuż nici, a więc w danym wypadku również pionowo, lecz działa na kulkę z dołu do góry, usiłując ją podnieść. Wyprowadźmy kulkę z położenia równowagi, odchylając ją np. do punktu 2. Wiemy z doświadczenia, że w tem nowem położeniu kulka nie pozostanie w spoczynku,

lecz natychmiast zacznie poruszać się, zdążając napowrót do położenia 1. Dlaczego? Opierając się na tem, cośmy mówili o działaniu sił wogóle, możemy wytłómaczyć sobie to zachowanie się kulki w sposób następujący. W położeniu 2 podobnie jak i w położeniu 1, na kulkę działają dwie siły: 1-o ciężar własny kulki, skierowany pionowo na dół, i 2-o napięcie sprężyste nici, działające wzdłuż tejże nici w kierunku od kulki ku punktowi zawieszenia. Ale w położeniu 1 oba te kierunki (uzmysłowione na fig. 14 za pomocą strzałek c (ciężar) i N (napięcie) stanowiły jeden przedłużenie drugiego, gdy tymczasem w położeniu 2 siły są względem siebie ukośne i przeto znieść się wzajemnie nie mogą, lecz dają zawsze wypadkową w kierunku **w**, która wywołuje powrotny ruch kulki. Gdy kulka znajdzie się w punkcie 1, napięcie nici po dawnemu równoważy się z ciężarem kulki, ale trwa to tylko chwilę. Istotnie, kulka dobiega do punktu 1 z pewną prędkością, nabytą przez czas podróży od 2 do 1, i wskutek tego na mocy bezwładności porusza się dalej na lewo. Z chwilą przejścia kulki przez punkt 1 napięcie nici i ciężar kulki przestają się równoważyć i dają siłę wypadkową w kierunku **w**, która niweczy stopniowo ruch kulki. Można dowieść, że ostateczne zniweczenie tej prędkości nastąpi wtedy, gdy kulka odchyli się na lewo na taką samą odległość, na jaką odciągnięta została pierwotnie na pra-

wo, tj. gdy się znajdzie w punkcie 3. W położeniu 3 kulka nie może pozostać w spoczynku dla tych samych powodów, dla których nie mogła pozostać w punkcie 2, zacznie więc znowu spadać ku punktowi 1, a nabywszy w tej drodze prędkości, przejdzie przez 1, wzniesie się do 2, wróci do 1, wzniesie się do 3 itd. itd. Wahania takie trwałyby bez końca, gdyby nie opór powietrza i nie tarcie nitki w punkcie zawieszenia.

Odchylając kulkę, wykonywamy pracę wbrew sile ciężkości (siła mięśni naszych przenosi swój punkt przyłożenia) i tą drogą wytwarzamy w kulce energię potencyalną, wynikającą z jej położenia, wzniesionego ponad poziom punktu 1. Z chwilą puszczenia kulki energia potencyalna zaczyna przetwarzać się na energię kinetyczną. Znalazłszy się w punkcie 1, kulka posiada już tylko energię kinetyczną, która w drodze od 1 do 3 przetwarza się znowu w energię potencyalną. W punkcie 3 kulka posiada przez chwilę tylko energię potencyalną, która w drodze od 3 do 1 zamienia się na energię kinetyczną itd. itd.

Wskutek tarcia w punkcie zawieszenia, tudzież oporu powietrza, część energii, udzielonej pierwotnie wahadłu, zamienia się na energię cieplną, część przenosi się w postaci energii mechanicznej na cząstki otaczającego powietrza, część przeradza się w energię elektryczną itd.

—jednem słowem, następuje szereg strat, wskutek których ilość energii, posiadanej przez wahadło, maleje, aż do zupełnego wyczerpania się, a wtedy ruch ustaje.

Wspominaliśmy już, że drgania, wykonywane przez ciała dźwięczące, przebiegają, co do istoty swej, zupełnie tak samo, jak wahnięcia wahadła. Ciało takie, jak pręt stalowy, struna, kamerton, błona bębna, ściana dzwonu, wyprowadzone z położenia równowagi przez siłę zewnętrzną, np. wychylone na prawo, powraca do tego położenia za sprawą rozbudzonych sił sprężystych i, osięgnąwszy podczas tej drogi pewną prędkość, na mocy bezwładności porusza się dalej, tj. wychyla się na lewo. To nowe wychylenie, równe co do wielkości pierwotnemu, odbywa się wbrew siłom sprężystym, które naprzód niweczą prędkość nabytą ciała, a następnie zmuszają je do powrotu; ciało przebiega znowu przez położenie równowagi z pewną prędkością, znów wychyla się wbrew siłom sprężystym — tym razem na prawo, tj. tak samo, jak za pierwszym razem, poczem następuje nowy powrót do położenia równowagi, nowe wychylenie na lewo itd. itd. Jak widzimy, opis szeregu drgań ciała dźwięczącego jest powtórzeniem opisu wahnięć, wykonywanych przez naszą kulkę, zawieszoną na nitce, z tą tylko różnicą, że zamiast siły ciężkości, którą tam pobudziliśmy do działania przez odchyle-

nie wahadła od pionu, mamy tutaj siły, które wzbudzamy w ciele przez wyprowadzenie go wogóle z położenia równowagi. Można powiedzieć, że, odchylając kulkę wahadła napinamy jak gdyby niewidzialną nić sprężystą, łączącą tę kulkę z ziemią całkiem podobnie, jak napinamy np. strunę przez odprowadzenie jej na bok.

§ 26. **Rozchodzenie się głosu.** Rozpatrzymy teraz, jaki wpływ wywiera ciało dźwięczące na stan mechaniczny powietrza, wśród którego jest umieszczone.

Gdy pręt drgający (fig. 13), umieszczony np. w środku pokoju, wykonywa wahnięcia, przebiegając na prawo, potrąca on w tym samym kierunku najbliższą sobie warstwę powietrza. Warstwa ta, którą nazwać możemy warstwą Nr. 1, natrafiwszy w ruchu swym na opór bezwładny warstwy następnej, którą nazwiemy warstwą Nr. 2, zostaje jak gdyby zgnieciona pomiędzy prętem a tą swoją na razie nieruchomą sąsiadką i wskutek tego zgęszcza się w pierwszej chwili. Ale, będąc z natury swej sprężysta, rozpręża się niebawem i potrąca warstwę Nr. 2 w taki sam zupełnie sposób, w jaki sama została potrącona przez wychylający się pręt. Warstwa Nr. 2, znalazłszy się pomiędzy napierającą na nią warstwą Nr. 1 a opierającą się wskutek bezwładności warstwą Nr. 3, ulega z kolei zgęszczeniu, by po chwili, rozpręży-

wszy się, potrącić warstwę Nr. 3. Zupełnie tak samo warstwa Nr. 3 potrąci warstwę Nr. 4, warstwa Nr. 4 — warstwę Nr. 5 itd. itd. Przytem każda warstwa poprzednia, potrąciwszy warstwę następną, traci ruch własny i przechodzi w stan spoczynku, podobnie jak się zdarzało przy uderzaniu się kul sprężystych. Łatwo zrozumieć, że tym sposobem zgęszczenie powietrza, wywołane przez odchylenie się pręta w bezpośredniem jego sąsiedztwie, ukaże się po pewnym czasie w warstwie powietrza, znajdującej się w końcu pokoju, przyczem na całej przestrzeni pomiędzy prętem a tą warstwą, powietrze będzie już w spoczynku i będzie posiadało wszędzie gęstość normalną.

Chcąc zobrazować w krótkości wyżej opisane zjawisko, powiadamy, że w powietrzu pomiędzy prętem a ścianą pokoju, przebiegła fala zgęszczenia. Wyrazu "fala" używamy tu z powodu podobieństwa, jakie zachodzi pomiędzy rozchodzeniem się tych zgęszczeń a rozchodzeniem się fal (kręgów) na powierzchni tafli wodnej, gdy zamącimy jej równowagę np. przez wrzucanie kamienia. Cechą charakterystyczną dla obu zjawisk jest to, że w nich rozchodzi się, postępuje naprzód bynajmniej nie materya sama, lecz tylko pewien stan tej materyi, pewne zaburzenie jej równowagi. Ani cząstki powietrza, przez które przebiega fala zgęszczenia, ani cząstki wody, na której rozchodzą się kręgi, nie posia-

dają ruchu postępowego, lecz wykonywają jedynie wahania, nie wychylając się poza obręb odpowiedniej warstwy lub kręgu.

Jeżeli teraz pręt nasz, wychylony, jak pamiętamy, na prawo, wahnie się szybko, przebiegając na lewo, to w pierwszej chwili pomiędzy nim a warstwą, Nr. 1 otworzy się próżna przestrzeń. Na przestrzeń tę rzuca się, by ją zapełnić, powietrze warstwy Nr. 1, wskutek czego samo ulega rozrzedzeniu. Warstwa Nr. 2, znalazłszy się pomiędzy tą rozrzedzoną warstwą Nr. 1 a nieruchomą na razie warstwą Nr. 3, rozrzedza się również, wpadając na warstwę Nr. 1. W ten sam zupełnie sposób wpadnie warstwa Nr. 3 na rozrzedzoną warstwę Nr. 2, warstwa Nr. 4 na rozrzedzoną warstwę Nr. 3 itd. itd., przyczem rozrzedzenie postępuje naprzód tak samo, jak poprzednio postępowało naprzód zgęszczenie, a każda warstwa powietrza po przejściu przez nią f a l i rozrzedzenia powraca do stanu normalnego; po upływie pewnego czasu od chwili cofnięcia się pręta na lewo w warstwie powietrza, znajdującej się w końcu pokoju, zamiast zgęszczenia ukaże się rozrzedzenie.

Widzimy więc, że jeżeli wychylenie pręta na prawo wywołuje w pewnem miejscu pokoju zgęszczenie powietrza, to wychylenie tegoż pręta na lewo wywołuje w tem samem miejscu pokoju — rozrzedzenie, a stąd wynika, że stałe

drganie pręta wywołuje w temże miejscu nieprzerwany szereg kolejnych zgęszczeń i rozrzedzeń, z których każde ukaże się po upływie pewnego czasu od chwili wykonania przez pręt drgający odpowiedniego ruchu — czasu zależnego od prędkości, z jaką posuwa się fala zgęszczeń lub rozrzedzeń.

Ucho nasze, znalazłszy się w miejscu, w którem ukazują się takie szybko po sobie następujące zgęszczenia i rozrzedzenia, odczuwa to zjawisko, jako wrażenie słuchowe, jako głos, i na mocy wprawy oryentuje się co do miejsca skąd przybywają fale. Środowiskiem, w którym rozchodzą się te fale głosowe, bywa najczęściej powietrze,chociaż może niem być każde inne ciało,np. woda, ziemia,drzewo. Jednakże w środowisku tym nie powinno być przerw, tj. miejsc pozbawionych materyi. Jeżeli na drodze pomiędzy ciałem dźwięczącem a uchem znajdzie się taka przerwa, to fale głosowe nie mogą przedostać się przez nią i głosu nie usłyszymy. Tak np. jeżeli zawiesiwszy dzwonek w balonie szklanym (fig. 15),wyciągniemy z balonu powietrze, to pomimo wstrząsania dzwonka nie usłyszymy głosu, chociaż widzimy najwyraźniej, że dzwonek "dzwoni."

§ 27. **Prędkość głosu.** Przez prędkość głosu rozumiemy prędkość, z którą posuwają się naprzód fale zgęszczenia i rozrzedzenia. Pręd-


Fig. 15

kość ta zależy li tylko od dwóch czynników: 1-o od stopnia ściśliwości ośrodka, w którym głos się rozchodzi (powietrza, wody, ziemi itp.), 2-o od gęstości tego ośrodka. W ośrodkach łatwo ściśliwych a gęstych prędkość głosu jest najmniejsza; w ośrodkach trudno ściśliwych a posiadających małą gęstość — największa. Jeżeli dwa ciała są jednakowo ściśliwe, to prędkość głosu jest większa w tym z pomiędzy nich, które posiada gęstość mniejszą. Powietrze i wodór są jednakowo ściśliwe, ponieważ jednak gęstość wodoru jest mniejsza, przeto prędkość głosu w wodorze jest większa, aniżeli w powietrzu.

Prędkość głosu nie zależy zupełnie od własności samego ciała dźwięczącego, ani od rodzaju samego głosu, tj. od rodzaju drgań, wykonywanych przez ciało dźwięczące. Głosy słabe i silne, wysokie i nizkie, tony fortepianu i głos ludzki, huk wystrzału i szmer strumyka rozchodzą się w jednym i tym samym ośrodku z prędkością ściśle jednakową.

Prędkość głosu w powietrzu można zmierzyć na zasadzie następującej uwagi.

Przy wystrzale działowym powstaje jednocześnie błysk ognia i głos. Otóż prędkość świa-

tła jest tak olbrzymia, że obserwator, stojący w odległości kilkunastu kilometrów od działa, spostrzega błysk — praktycznie rzecz biorąc — w samej chwili wystrzału, gdy tymczasem fala głosowa dobiega do jego ucha dopiero po upływie kilkudziesięciu sekund. Oznaczywszy przy pomocy chronometru czas, upływający pomiędzy chwilą ukazania się światła a chwilą usłyszenia huku, znajdziemy tem samem czas, którego potrzebuje fala na przebycie odległości pomiędzy działem a obserwatorem, zaś dzieląc tę odległość przez znaleziony czas, otrzymamy prędkość, z którą biegła fala, czyli prędkość rozchodzenia się głosu w powietrzu.

Przekonano się, że prędkość głosu w powietrzu wynosi w liczbie okrągłej 330 metrów na sekundę przy temperaturze 0^0C i wzrasta nieco ze wzrastaniem temperatury, a to wskutek tego, że powietrze cieplejsze jest zarazm mniej gęste.

W wodzie prędkość głosu wynosi 1440 metrów na sekundę, w wodorze — 1200 m. na sek., w stali—5000 m. na sek.

§ 28. **Dźwięk. Wysokość, barwa i siła dźwięku.** Jeżeli wrażenie słuchowe, wywołane przez dany głos, posiada cechę pewnej jednolitości i niezmienności, dzięki czemu możemy mówić o takiej lub innej jego wysokości, to taki głos nazywamy d ź w i ę k i e m; w razie przeciwnym mamy szmer, hałas, huk, itp. Do-

świadczenie uczy, że dźwięki muzyczne mają swe źródło w bardzo prawidłowych drganiach ciał dźwięczących,gdy tymczasem drgania nieregularne, krzyżujące się, urywane etc. dają początek szmerom, szelestom itp.

Wysokość dźwięku zależy jedynie od częstości drgań, tj. od liczby drgań, które ciało dźwięczące wykonywa na sekundę. Im drgania są częstsze, tem dźwięk jest wyższy,ostrzejszy. Jeżeli koło zębate, osadzone na stałej osi, wprowadzimy w ruch obrotowy i pozwolimy zębom uderzać o podstawiony kawałek giętkiej tektury, np. o zwykłą kartę do grania, to przy pewnej częstości uderzeń (począwszy od 30 na sekundę) usłyszymy zamiast pojedyńczych uderzeń dźwięk ciągły, którego wysokość będzie wzrastała w miarę wzrastania szybkości obrotu, tj. w miarę zwiększania się liczby wahnięć karty, przypadającej na sekundę. Przy stałej szybkości obrotu wysokość dźwięku pozostaje niezmienną. W miarę zmniejszenia się szybkości koła, karta wydaje dźwięk coraz to niższy.

W dźwiękach, któremi posługuje się muzyka, liczba drgań wynosi od 40 do 4000 drgań na sekundę. Wprawne ucho upatruje pomiędzy dźwiękami o różnej wysokości pewne pokrewieństwa, które okazują się zależnemi od pewnych prostych stosunków pomiędzy wysokościami. Tak np. jeżeli z dwuch słyszanych dźwięków jeden jest oktawą drugiego, to bada-

jąc je pod względem liczby drgań, przekonamy się, że jest ona dla jednego z dźwięków ściśle dwa razy większa, aniżeli dla drugiego. Jeżeli dla wyższego z pomiędzy tych dźwięków liczba drgań wynosi np. 1000 na sekundę, to dla niższego wyniesie 500 na sekundę.

Barwą czyli odcieniem dźwięku nazywamy tę jego właściwość, która stanowi o różnicy pomiędzy dźwiękami jednej wysokości wydawanymi przez różne ciała dźwięczące. Barwa dźwięku zależy od sposobu, w jaki przebiega pojedyńcze drganie. Dźwięk pewnej danej wysokości, wzięty na fortepianie, jest całkiem niepodobny do dźwięku tejże wysokości, wziętego na skrzypkach—posiada odmienną barwę.

Siła czyli natężenie dźwięku w pewnem danem miejscu przestrzeni zależy od rozległości drgań, wykonywanych w tem miejscu przez cząstki powietrza wskutek ukazania się w niem fali dźwięczącej. Ta rozległość drgań zależy znowu w pierwszej linii od rozległości drgań samego źródła dźwięku, a więc np. od wielkości wychyleń naszego pręta z fig. 13, ale oprócz tego na natężenie dźwięku w danem miejscu przestrzeni mogą wpływać i inne okoliczności, np. odległość tego miejsca od ciała dźwięczącego. Struna, wychylająca się daleko z położenia równowagi, wydaje na ogół dźwięk mocniejszy aniżeli struna, wychylająca się nieznacznie; w

miarę zmniejszenia się tych wychyleń słabnie stopniowo siła wydawanego dźwięku, chociaż wysokość jego i barwa nie ulegają wskutek tego żadnej zmianie. Jeżeli fale głosowe nie postępują w jednym tylko kierunku, lecz rozchodzą się ze źródła na wszystkie strony — co jest wypadkiem najczęstszym — to w każdej następnej fali wychylenia drgających cząstek powietrza są mniejsze, aniżeli w fali poprzedniej —siła głosu słabnie w miarę oddalenia się od źródła.

§ 29. **Echo.** Jeżeli szereg posuwających się fal głosowych napotka na swej drodze jakąś przeszkodę np. ścianę pokoju, to wówczas odbija się od niej na podobieństwo kul sprężystych, uderzających o nieruchomą płytę. Jeżeli przed



Fig. 16

uderzeniem fale poruszały się prostopadle do ściany, to po uderzeniu wracać będą tą samą

drogą, którą przyszły; jeżeli uderzenie było ukośne, fale odskoczą od ściany pod takim samym kątem, pod jakim w nią uderzyły. Zjawisko, znane pod nazwą echa (fig. 16), polega na takiem właśnie odbijaniu się fal głosowych od budynków, skał, gęstych zarośli itd.

§ 30. **O interferencyi fal głosowych.** Jeżeli dwa ciała Nr. 1 i Nr. 2 dźwięczą jednocześnie, to przez jeden i ten sam punkt przestrzeni przebiegają: 1-o fale zgęszczenia i rozrzedzenia, wysyłane przez ciało Nr. 1, 2-o fale zgęszczenia i rozrzedzenia, wysyłane przez ciało Nr. 2. Jeżeli przez dany punkt jednocześnie z falą zgęszczenia, pochodzącą od ciała Nr. 1, przebiega fala zgęszczenia, pochodząca od ciała Nr. 2, to w punkcie tym następuje zgęszczenie podwójne (o ile fale były równej siły); w chwilę potem dwa jednocześnie nadbiegłe rozrzedzenia dadzą w tymże punkcie rozrzedzenie podwójne. Wynik ostateczny będzie taki, jak gdyby przez dany punkt przebiegła fala, wysłana przez jedno ciało dźwięczące o podwójnej rozległości drgań — ucho umieszczone w tym punkcie powinno usłyszeć głos podwójnej siły. Odwrotnie, jeżeli przez dany punkt jednocześnie z falą zgęszczenia, pochodzącą od ciała Nr. 1, przebiega fala rozrzedzenia, pochodząca od ciała Nr. 2, to w punkcie tym nastąpi wyrównanie gęstości; podobne wyrównanie nastąpi w chwilę potem pomiędzy falą rozrzedzenia, pocho-

dzącą od ciała Nr. 1, a falą zgęszczenia, pochodzącą od ciała Nr. 2. Wynik ostateczny będzie tym razem taki, jak gdyby przez dany punkt fale głosowe nie przebiegały wcale — ucho umieszczone w tym punkcie nie powinno usłyszeć żadnego głosu.

Doświadczenie potwierdza w zupełności te przewidywania. Biorąc dwa źródła głosu zupełnie jednakowe i regulując ich wzajemne położenie w taki sposób, żeby wysyłane przez nie fale zgęszczenia i rozrzedzenia zlewały się ze sobą dokładnie lub znosiły całkowicie, można istotnie otrzymać podwojenie siły głosu lub zanik jego zupełny. W warunkach zwyczajnych, gdy niema dokładnego pokrywania się zgęszczeń i rozrzedzeń, taka **interferencya** fal głosowych objawia się jako częściowe wzmocnienie lub osłabienie głosu.



I.

Termometrya i Kalorymetrya.

§ 1. **Temperatura.** Ręka, wsadzona w wodę zimną, doznaje innego wrażenia,aniżeli ręka wsadzona w wodę gorącą: organizm nasz rozróżnia więc rozmaite stany wody pod względem pewnego czynnika,który nazywamy c i e p ł e m. To samo rozróżnienie stosuje się do wszystkich ciał,z któremi skóra nasza wchodzi w zetknięcie. Przytem, organizm nasz nie zadawala się tem, że dzieli ciała na ciepłe i zimne podług tego, czy wywołują one za dotknięciem uczucie ciepła lub zimna, lecz zdolny jest także oceniać stopniowania, jakie pod tym względem zachodzą w stanie ciał, innemi słowy, zdolny jest oceniać stopień ciepła, czyli t e m p e r a t u r ę ciał.

Wszelako nietrudno jest zauważyć, że ocena taka jest na ogół bardzo niedokładna, a często nawet bywa wprost bałamutna. Istotnie, jeżeli np. do miednicy z wodą letnią włożymy raz rękę, którą uprzednio trzymaliśmy w wodzie z lodem, a drugi raz rękę, świeżo wyjętą z wody gorącej, to za pierwszym razem doświadczymy uczucia ciepła, za drugim razem — uczucia zimna, pomimo, że w obu razach mamy do czynienia z wodą, będącą w jednym i tym samym

stanie cieplnym, tj. z wodą, posiadającą jedną i tę samą temperaturę. Oczywiście, nie może być mowy o naukowem zużytkowaniu tak niepewnych wskazówek; musimy przeto poszukać innego środka, któryby nam pozwolił określić temperaturę danego ciała niezależnie od niedokładnych i zmiennych wrażeń fizyologicznych. Takiego środka dostarcza nam np. pomiar objętości danego ciała, który może służyć za miarę jego temperatury, albowiem doświadczenie uczy, że każdej zmianie temperatury towarzyszy zmiana objętości (przy innych warunkach równych).

Z drugiej strony, doświadczenie uczy, że dwa ciała niejednakowo ciepłe, wprowadzone ze sobą w zetknięcie, zmieniają się z biegiem czasu w taki sposób, że ciało cieplejsze staje się mniej ciepłem, a ciało zimniejsze mniej zimnem, i że te dwa procesy: stygnięcie pierwszego ciała i ogrzewanie się drugiego,trwają dopóty, dopóki ciała te nie staną się jednakowo ciepłemi, innemi słowy, dopóki nie nastąpi wyrównanie się temperatur. Rzecz prosta, że po takiem wyrównaniu się temperatur wystarczy określić temperaturę jednego z ciał, by tem samem oznaczyć temperaturę drugiego. Stąd płynie następująca wskazówka, dotycząca porównywania temperatur różnych ciał. Obieramy sobie jedno jakieś ciało, którego temperaturę łatwo jest określić w każdej chwili podług zaj-

mowanej objętości, i ciało to wprowadzamy w zetknięcie z rozmaitemi ciałami, których temperaturę zamierzamy oznaczyć. W każdym z tych wypadków, po niejakim czasie, następuje wyrównanie się temperatury pomiędzy danem ciałem a obranem przez nas ciałem wzorcowem, a ponieważ z objętości tego ostatniego umiemy wnosić o jego temperaturze, przeto jednocześnie otrzymujemy także temperaturę danego ciała.Takiem ciałem wzorcowem jest np. znany powszechnie przyrząd—termometr rtęciowy.

§ 2. **Termometr rtęciowy.** Chcąc sporządzić sobie termometr rtęciowy, bierzemy włoskowatą rurkę szklaną, wydętą u dolnego końca w kulkę lub wałeczek, napełniamy ją rtęcią i, ogrzawszy do najwyższej temperatury, jaką ma mierzyć przyszły termometr, zatapiamy rurkę tuż nad słupkiem rtęci. Wracając do zwykłej temperatury,słupek rtęci kurczy się i zostawia w rurce nad sobą próżnię. Przy ogrzewaniu takiej rurki, zarówno rtęć, jak i szkło, rozszerzają się: wskutek rozszerzania się rtęci poziom w rurce dąży do podniesienia się:natomiast wskutek rozszerzania się szkła naczynie termometryczne staje się pojemniejszem, i poziom rtęci dąży do obniżenia się: ponieważ jednak rtęć rozszerza się 7 razy mocniej niż szkło, przeto przy ogrzewaniu naszej rurki będziemy mieli w ostatecznym wyniku podnoszenie się słupka rtęci, a przy oziębieniu rurki obniżenie się tego

słupka. Rozszerzenie się rtęci, które obserwujemy w naczyniu szklanem, jest rozszerzaniem się pozornem·. jest ono mniejsze od rozszerzania się rzeczywistego, tj. od rozszerzania się, którebyśmy zaobserwowali, gdyby rtęć znajdowała się w naczyniu nierozszerzalnem (w rzeczywistości naczynie takie nie istnieje).

Przygotowawszy w powyższy sposób termometr, przystępujemy do oznaczenia jego tak zwanych punktów stałych. W tym celu wstawiamy termometr najprzód w mieszaninę lodu i wody i, poczekawszy, aż słupek rtęci stanie nieruchomo, oznaczamy to miejsce rurki np. kreską, zrobioną dyamentem. Doświadczenie stwierdza, że gdziekolwiek i kiedykolwiek wstawimy nasz przyrząd w powyższą mieszaninę, zawsze słupek rtęci zatrzyma się na tej samej kresce, którą zrobiliśmy za pierwszym razem,i wskaże tym sposobem punkt stały termometru, zwany punktem tajania lodu.

Umieściwszy następnie przyrząd nasz w wodzie, wrzącej pod ciśnieniem normalnem (właściwie w parze, wywiązującej się z takiej wody; porównaj § 20), czekamy, aż rtęć przestanie się podnosić,i oznaczamy wtedy kreską drugi punkt stały termometru — punkt wrzenia wody, na którym zawsze zatrzymywać się będzie słupek, ilekroć zanurzymy przyrząd w taką parę.

Przebieg rurki pomiędzy dwiema otrzymane-

mi kreskami dzielimy na 100 części równej objętości (jeżeli wnętrze rurki jest ściśle cylindryczne, to dość jest w tym celu podzielić ją na części równej długości; w przeciwnym razie potrzebne jest specyalne odmierzanie — tak zwane kalibrowanie termometru) i taką samą skalę rozciągamy poniżej punktu 0 i powyżej punktu 100. Termometr jest wtedy gotowy.

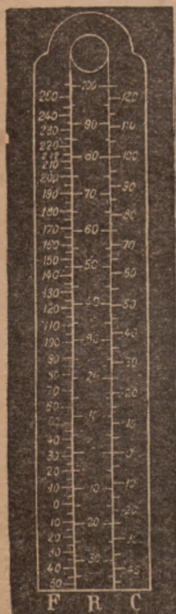


Fig. 1

Skale termometyczne
F Fahrenheita
R Reaumura
C Celsiusza

Jeżeli, po wyrównaniu się temperatur pomiędzy takim termometrem a pewnem danem ciałem, słupek rtęci stoi na 10-ej, 80-ej, 150ej... kresce podziałki, licząc w górę od zera, lub też na 5-ej 10-ej, 30-ej kresce, licząc w dół od zera, to powiadamy, że temperatura danego ciała wynosi + 10°C., +80°C., +150°C., —5°C.,—10°C., —30°C., (czytaj: stopni Celsyusza czyli skali stustopniowej).

Dzieląc odległość pomiędzy punktem tajania lodu, a punktem wrzenia wody na 80 części, zamiast na 100, otrzymamy skalę Reaumura; dzieląc wreszcie tę odległość na 180 części i oznaczając przytem punkt tajania lodu

liczbą 32, a zatem punkt wrzenia wody liczbą 32+180=212, otrzymamy skalę Fahrenheita (fig. 1).

§ 3. **O rozszerzaniu się ciał stałych.** Z bardzo nielicznymi wyjątkami wszystkie ciała stałe rozszerzają się przy ogrzewaniu, kurczą się przy oziębianiu (z pomiędzy ciał bardziej znanych kauczuk kurczy się przy ogrzewaniu, rozszerza się przy oziębianiu). Jeżeli sztabę cynkową, której długość, mierzona przy temperaturze 0°C., wynosi metr, ogrzejmy do 100°C., to wydłuży się ona o 3 milimetry, tj. o 0.003 pierwotnej swej długości. Część tego wydłużenia, przypadająca przeciętnie na 1°C., nazywa się współczynnikiem rozszerzalności liniowej; a zatem współczynnikiem rozszerzalności liniowej cynku pomiędzy temperaturami 0°C. i 100°C. będzie liczba 0,003: 100=0,00003.

Oto współczynniki rozszerzalności liniowej niektórych ciał pomiędzy 0°C. a 100°C:

Cynk	0,000030
Cyna	0,000020
Srebro	0,000019
Złoto	0,000015
Żelazo	0,000012
Szkło zwycz.	0,000009
Cegła	0,000005
Drzewo sosnowe	0,000004

Na podobieństwo współczynnika rozszerzal-

ności liniowej tworzymy współczynnik rozszerzalności objętościowej. Jeżeli przy ogrzewaniu od 0^0C., do 100^0C., bryła pewnej substancyi powiększa się o 0,009 swej objętości pierwotnej, to powiadamy, że pomiędzy 0^0C., a 100^0C współczynnik rozszerzalności objętościowej dla tej substancyi wynosi 0,009:100=0,00009. Można dowieść, że, jeżeli wydłużenie jest małe w stosunku do długości pierwotnej — a taki właśnie wypadek zachodzi zawsze przy rozszerzaniu się ciał od ciepła — to współczynnik rozszerzalności objętościowej równa się w przybliżeniu potrojonemu współczynnikowi rozszerzalności liniowej. Tym sposobem współczynnik rozszerzalności objętościowej wynosi np.:

dla cynku 0,00003×3=0,0009;
dla cyny 0,00002×3=0,00006;
dla szkła 0,000009×3=0,000027 etc.

§4. **O rozszerzaniu się cieczy.** Gdy chodzi o rozszerzalność cieczy, należy odróżniać współczynnik rozszerzalności rzeczywistej od współczynnika rozszerzalności pozornej, będącej wynikiem jednoczesnego rozszerzania się cieczy samej i naczynia, w którym ciecz ta jest zawarta. Dla rtęci pierwszy współczynnik wynosi 0,000182, drugi—w termometrze ze szkła zwyczajnego — 0,000155; różnica ich, równa 0,000027, przedstawia nam współczynnik rozszerzalności szkła termometrycznego. Woda

kurczy się przy ogrzewaniu od 0^0 do 4^0 i dopiero począwszy od tej ostatniej temperatury zaczyna się rozszerzać; tym sposobem przy temperaturze 4^0C., ciecz ta posiada największą gęstość.

§ 5. **O rozszerzaniu się gazów. Prawo Gay-Lussaca.** Gazy rozszerzają się pod wpływem ciepła o wiele znaczniej, aniżeli ciała stałe lub ciecze. Gay-Lussac stwierdził (1802), że wszystkie gazy mają jeden i ten sam współczynnik rozszerzalności. Podług najnowszych pomiarów współczynnik ten równa się $\frac{1}{273}$ to znaczy, że każdy gaz, ogrzewany pod ciśnieniem stałem (a więc w naczyniu o ruchomej ścianie, np. w rurce zamkniętej tłokiem) przy podniesieniu temperatury o 1^0C. rozszerza się (posuwając tłok) o $\frac{1}{273}$ część tej objętości, którą zajmował przy temperaturze 0^0C. Tak np. masa powietrza, która znajdując się pod pewnem określonem ciśnieniem, zajmuje przy temperaturze 0^0C. objętość jednego litra, zajmować będzie przy temperaturze 15^0 (pod tem samem ciśnieniem) objętość

$1\frac{15}{273}$ litra, przy temperaturze 100^0C. — obję-

tość $1\frac{100}{273}$, przy temperaturze 273°C. objętość 2 litrów itd.

Przy oziębianiu gazu, znajdującego się pod ciśnieniem stałem, objętość jego zmniejsza się w taki sam zupełnie sposób, w jaki zwiększała się przy ogrzewaniu, A zatem przy temperaturze — 10°C. wspomniana przez nas masa powietrza zajmie objętość

$1\frac{10}{273}=\frac{263}{273}$ litra, przy temperaturze — 30°C.

objętość $\frac{243}{273}$ litra itd.

Jeżeli ogrzewać będziemy gaz *przy objętości stałej*, tj. w naczyniu o ściankach nieruchomych, natenczas nie może on, rzecz prosta, rozszerzyć się, ale natomiast z podniesieniem temperatury o każdy stopień skali stustopniowej wzrasta ciśnienie gazu o $\frac{1}{273}$ część tego ciśnienia, które gaz nasz posiadał przy temperaturze 0°C. Ostatecznie, wynik jest taki, jak gdybyśmy naszej masie gazowej naprzód pozwolili rozszerzyć się pod ciśnieniem stałem, a następnie już rozszerzoną ścisnęli o $\frac{1}{273}$ część

objętości pierwotnej. Ułamek $\frac{1}{273}$ jest więc zarazem współczynnikiem rozszerzalności gazów przy ciśnieniu stałem i współczynnikiem rozszerzalności gazów przy objętości stałej. Zauważmy nawiasowo,że w tym drugim wypadku termin, współczynnik rozszerzalności, brzmieniem swem nie odpowiada rzeczywistemu stanowi rzeczy, ponieważ nie może być mowy o rozszerzaniu się czegokolwiek przy objętości stałej; swoją drogą utarł się on w języku naukowym.

Całkiem podobnie, oziębienie gazu przy objętości stałej o 1°C. powoduje zmniejszenie się jego ciśnienia o $\frac{1}{273}$ część tego ciśnienia, które gaz posiadał przy temperaturze 0°C. Przy temperaturach — 10°C., — 20°C., — 100°... gaz taki posiadać będzie ciśnienia, równe odpowiednio $\frac{263}{273}$, $\frac{253}{273}$, $\frac{173}{273}$ tego ciśnienia, które posiadał przy 0°C.

§ 6. **Bezwzględne zero temperatury.** Gdyby przypuścić, że powyższe prawo zmniejszania się ciśnienia w gazie zachowuje moc swoją przy wszelkich możliwych temperaturach, i pomyśleć temperaturę o 273°C. niższą od 0°C.,

to przy takiej temperaturze ciśnienie naszego gazu zmniejszyłoby się o całe $\frac{273}{273}$ ciśnienia pierwotnego, czyli stałoby się równe zeru — gaz przestałby wywierać jakiekolwiek ciśnienie. Temperatura — 273^{0}C., przy której teoretycznie rzecz biorąc, akt taki musiałby nastąpić, nosi miano *bezwzględnego zera temperatury*.

Temperatury, liczone na skali stustopniowej poczynając od tego zera, zamiast od punktu tajania lodu, nazywają się temperaturami bezwzględnemi. Tak np. temperaturom: 10^{0}C., 15^{0}C., 120^{0}C.,—25^{0}C. odpowiadają temperatury bezwzględne: 283 stopnie, 288 stopni, 393 stopnie, 248 stopni... Pojęcie temperatury bezwzględnej odgrywa w nauce fizyki ważną rolę, której rozpatrywać tutaj nie możemy.

§ 7. **Braki termometru rtęciowego. Termometr gazowy.** Przedewszystkiem, termometr rtęciowy nie może być używany do mierzenia temperatur, niższych od temperatury zamarzania rtęci (—38^{0}C.) i wyższych od temperatury wrzenia rtęci.

Powtóre, zero w termometrze rtęciowym nie jest, ściśle rzecz biorąc, punktem stałym, a to z dwóch głównie powodów: 1^0 świeżo sporządzona rurka szklana przez lata całe ulega powolnemu kurczeniu się, skutkiem czego rzeczywi-

ste zero termometru podnosi się z biegiem czasu w stosunku do zera, oznaczonego kreską: termometr wskazuje temperaturę za wysoką; 2⁰ szkło, raz ogrzane, wraca do pierwotnej objętości bardzo powoli; po każdym więc wypadku ogrzania termometru będzie on przez czas jakiś pojemniejszy, niż należy, a zatem zero rzeczywiste będzie stało niżej od zera, oznaczonego kreską: termometr wskazywać będzie temperaturę zbyt nizką.

Potrzecie, wysokość temperatury, wskazywanej przez termometr rtęciowy, zależy w pewnej mierze od gatunku szkła termometrycznego, mianowicie od sposobu, w jaki to szkło rozszerza się pod działaniem ciepła. W samej rzeczy, dwa termometry rtęciowe stustopniowe wskazują ściśle zgodnie punkty stałe 0⁰ i 100⁰C.; ponieważ jednak temperatura mierzy się pozornem nie zaś rzeczywistem rozszerzeniem rtęci, przeto, jeżeli szkło jednego z tych termometrów rozszerza się podług innego prawa, aniżeli szkło drugiego, to i pojemność rurki u pierwszego zmieniać się będzie inaczej niż u drugiego, a wskutek tego, z wyjątkiem w punktach 0⁰ i 100⁰, pierwszy przyrząd wskazywać może temperaturę inną, aniżeli drugi. Różnica ta dochodzi niekiedy do kilku stopni, zwłaszcza przy temperaturach, znacznie wyższych od 100⁰C. lub znacznie niższych od 0⁰C. Tak np. jeden ter-

mometr wskazywać może 204°C. tam, gdzie drugi wskazuje tylko 200°C., pomimo że zgadzają się one ze sobą jaknajdokładniej przy 0°C. i 100°C. i oba skonstruowane są bez zarzutu. Zauważmy, że ten ostatni fakt poucza nas najlepiej o całej względności samego pojęcia temperatury, wskazywanej przez termometr.

Wobec wszystkich tych niedogodności korzystną jest rzeczą, zwykłe określenie temperatury, oparte na pozornem rozszerzaniu się rtęci (§ 2), zastąpić określeniem, opartem na rzeczywistem rozszerzeniu się jakiegoś gazu, np. powietrza lub wodoru. Teoretycznie, taki termometr gazowy wolny jest zupełnie od powyżej wymienionych braków; z jednej bowiem strony, taki wodór lub powietrze dają się utrzymać w jednym i tym samym stanie skupienia (gazowym) przy wszelkich znanych nam temperaturach zarówno najwyższych jak i najniższych; z drugiej zaś strony jest się uwolnionym z samej natury rzeczy od wpływu rozszerzania się naczynia termometrycznego. W praktyce, pierwszą z tych korzyści ogranicza nieco brak naczyń, dostatecznie wytrzymałych na bardzo wysokie temperatury, ale druga korzyść zachowuje się w całej pełni, albowiem ogromna rozszerzalność gazów, przewyższająca blizko 150 razy rozszerzalność szkła, sprawia to, że można zupełnie nie brać w rachubę różnych

drobnych nieprawidłowości w zachowywaniu się naczynia termometrycznego.

§ 8. **Termometr normalny.** Na mocy uchwały, powziętej w roku 1887ym przez Komisyę, międzynarodową, za termometr wzorowy, tj. taki, z którego wskazaniami należy porównywać wskazania wszystkich innych termometrów, uważa się termometr, napełniony wodorem.

Widzieliśmy, że rozszerzanie się gazu pod ciśnieniem stałem w zupełności odpowiada zwiększaniu się jego ciśnienia przy stałej objętości. Otóż okazało się rzeczą dogodną wnioskować o temperaturach nie z objętości, zajmowanych przy tych temperaturach przez pewną masę wodoru, znajdującą się pod stałem ciśnieniem, lecz przeciwnie, z ciśnień które wywiera ta masa (przy tychże temperaturach), zachowując objętość niezmienną.

Nie będziemy tu opisywali bliżej przyrządu, służącego do tego rodzaju pomiarów, a stanowiącego właśnie tak zwany termometr normalny; zaznaczymy tylko, że przy temperaturze tajania lodu, którą obieramy za zero, wodór, zawarty w takim termometrze, powinien, na zasadzie wspomnianej umowy międzynarodowej, wywierać ciśnienie, równe ciśnieniu słupa rtęci wysokiego na 1 metr (w miejscu gdzie przyśpieszenie siły ciężkości równa się 981 jednostkom).

Doświadczenie stwierdza,że przy temperaturze wrzenia wody, którą to temperaturę obieramy za 100⁰, wodór termometru normalnego wywierać będzie ciśnienie, równe 1.366 metra rtęci. A zatem przyrost w ciśnieniu wodoru pomiędzy temperaturą tajania lodu, a temperaturą wrzenia wody równa się ciśnieniu. 1.336—1 =0,366 metr. rtęci. Setna część tego przyrostu, tj. przyrost równy 0,00366 metr. rtęci, czyli, biorąc okrągło, przyrost, równy jednej dwieście siedemdziesiątej trzeciej $\left(\frac{1}{273}\right)$ części ciśnienia przy zerze, odpowiada więc przyrostowi temperatury o jeden stopień skali termometrycznej normalnej. Jeżeli zatem przy pewnych nieznanych nam temperaturach termometr normalny wykazuje ciśnienia, wynoszące:

$$1+\frac{15}{273},\qquad 1+\frac{50}{273},\qquad 1-\frac{20}{273}\ldots \text{ metra}$$

rtęci, to powiadamy, że szukane temperatury równają się +15, +50, —20 stopniom skali termometrycznej normalnej

Przyjmując opisany termometr wodorowy za termometr wzorowy, normalny, tem samem spychamy na stanowisko drugorzędne (teoretycznie) termometr rtęciowy, którego wskazania, przedtem miarodajne, teraz przedstawiają dla nas wartość tylko o tyle, o ile zostaną spraw-

dzone przez zestawienie ze wskazaniami termometru wodorowego.

Termometr rtęciowy jest bez żadnego porównania łatwiejszy w użyciu od termometru gazowego, którego stosowanie wymaga wielce subtelnych operacyi i w dodatku możliwe jest tylko w pewnych określonych warunkach. Z tego powodu w praktyce naukowej posługujemy się zazyczaj termometrami rtęciowymi, poprawionymi przez porównanie z termometrem normalnym.

§ 9. **Jednostka ilości ciepła.** Od pojęcia temperatury odróżniamy pojęcie ilości ciepła. Wanna wody ciepłej zawiera w sobie większą ilość ciepła, aniżeli łyżeczka gorącej herbaty, pomimo, że temperatura tej ostatniej może być znacznie wyższa. Ugotowanie 20 obiadów wymaga spalenia pod blachą większej ilości węgla, aniżeli ugotowanie 5 obiadów; w pierwszym wypadku potrzebna jest większa ilość ciepła aniżeli w drugim, chociaż wymagana temperatura jest jedna i ta sama.

Za jednostkę ilości ciepła obieramy ilość ciepła, potrzebną do ogrzania jednego grama wody, o 1°C. (oprównaj § 10). Ilość tę nazywamy kaloryą gramową lub małą. Kalorya kilogramowa czyli wielka równa się 1000 kaloryi gramowych.

§ 10. **Ciepło właściwe.** Doświadczenie u-

czy, że do ogrzania kilograma wody potrzebna jest większa ilość ciepła, aniżeli do takiego samego (tj. o tyleż stopni) ogrzania kilograma rtęci. Wyrażamy ten fakt, mówiąc, że ciepło właściwe wody jest większe od ciepła właściwego rtęci.

Ciepło właściwe pewnej danej substancyi mierzymy liczbą kaloryi, potrzebnych do ogrzania jednego grama tej substancyi o 1^0C. Na mocy samego określenia jednostki ciepła (§ 9) ciepło właściwe wody równa się 1.

Określenie ciepła właściwego danej substancyi może być dokonane w sposób następujący. Do tak zwanego kalorymetru wodnego (tj. naczynia, którego wnętrze jest możliwie dobrze zabezpieczone od wpływu temperatury zewnętrznej), zawierającego odważoną ilość wody, wrzucamy lub wlewamy odważoną również ilość danej substancyi,ogrzanej do temperatury wyższej, a po wyrównaniu się temperatur notujemy temperaturę wspólną. Mamy dane: ilość wody i jej temperaturę pierwotną; ilość danej substancyi i jej temperaturę pierwotną; ciepło właściwe wody, równe 1, i wreszcie temperaturę wspólną wody i substancyi. Z danych tych, przy pomocy kilku działań arytmetycznych wyprowadzić można wartość na szukane ciepło właściwe; nie będziemy zatrzymywali się nad tem obliczeniem.

Druga metoda określania ciepła właściwego

polega na tem, że określamy doświadczalnie ilość lodu, którą zdolna jest stopić odważona ilość danej substancyi, ogrzanej do pewnej określonej temperatury. Ponieważ wiadomo skądinąd (§ 12), że stopienie jednego grama lodu, posiadającego temperaturę 0°C., wymaga zużycia 80 kaloryi, przeto z faktu np, że gram miedzi, ogrzanej do 80°C., topi 1|10 grama takiego lodu, wnioskujemy odrazu, że ciepło właściwe miedzi równa się 0,1 (gram wody, ogrzanej do 80°C., stopiłby gram tegoż lodu).

W wypadku gazów określenie ciepła właściwego jest o wiele trudniejsze, niż w wypadku ciał stałych i cieczy, a to z powodu, że ilość ciepła, którą oddać może kalorymetrowi lub lodowi taka objętość gazu, jaką operować możemy w warunkach zwyczajnych, jest zbyt mała, aby mogła stanowić podstawę dla mniej więcej pewnych obliczeń, i że wskutek tego chcąc uzyskać taką podstawę, musielibyśmy brać ilości gazu olbrzymie. Prócz tego, ciepło właściwe gazu, utrzymywanego przez czas ogrzewania przy stałej objętości, jest inne, aniżeli ciepło właściwe tegoż gazu, utrzymywanego pod stałem ciśnieniem (§ 28). Z obu powyższych względów określanie ciepła właściwego gazów przedstawia się, jako zadanie trudne, wymagające zastosowania metod skomplikowanych, których opisywać tu nie możemy.

Ciepło właściwe danego ciała zależy zwykle

w pewnym acz niewielkim stopniu od temperatury: to znaczy, że dla ogrzania danego ciała np. od 0°C. do 1°C. potrzebna jest ilość ciepła nieco inna, aniżeli dla ogrzania tegoż ciała od 30° C. do 31°C. lub od 75°C. do 76°C. Ponieważ woda nie stanowi pod tym względem wyjątku, przeto przy określaniu ścisłem kaloryi fizycy wybierają pewien określony przedział temperatury, np. 0° — 1°C. albo 14½°C. — 15½oC. Ostatnimi czasy weszła w użycie kalorya, oparta na tym ostanim przedziale, to znaczy, że przez kaloryę gramową rozumiemy ilość ciepła, potrzebną do ogrzania grama wody od 14½°C. do 15½°C. W wielu bardzo badaniach określenie kaloryi, dane w § 9, jest zupełnie wystarczające.

Mówiąc o cieple właściwem pewnej substancyi, mamy zazwyczaj na myśli ciepło właściwe przeciętne pomiędzy 0°C. a 100°C. W następującej tablicy zestawione są ciepła właściwe niektórych ciał, przyczem ciepła właściwe gazów stosują się do ogrzewania pod stałem ciśnieniem.

Woda	1,00
Alkohol	0,60
Lód	0,50
Węgiel drzewny	0,25
Żelazo	0,11
Miedź	0,10
Złoto	0,03

Rtęć	0,03
Wodór	3,409
Powietrze	0,237
Tlen	0,217
Azot	0,241
Dwutlenek węgla	0,210

Ciepło właściwe wody większe jest, aniżeli ciepło właściwe jakiegokolwiek innego ciała, z wyjątkiem wodoru, dla którego wyraża się ono, jak widzimy, liczbą 3,409.



II.

O topieniu się i parowaniu.

§ 11. **Topienie się ciał.** Wiemy już (§ 2), że termometr, wstawiony w mieszaninę lodu (tj. wody stałej) i wody ciekłej, wskazuje zawsze jedną i tę samą temperaturę (którą obieramy za zero) całkiem niezależnie od tego, czy naczynie, zawierające taką mieszaninę, umieścimy na ogniu, czy też wystawimy na działanie mrozu. Wprawdzie w pierwszym wypadku znika stopniowo część stała mieszaniny, zamieniając się na ciecz, a w drugim wypadku, odwrotnie, część ciekła zamienia się na ciało stałe, dopóki jednak nie roztopi się ostatni kawałek lodu lub też nie zamarznie ostatnia resztka wody, dopóty słupek rtęci nie zmienia swego położenia w rurce termometru, jeżeli tylko przez częste mieszanie utrzymywać będziemy w naczyniu stan rzeczywistej mieszaniny. Dopiero z chwilą, gdy w miejscu mieszaniny otrzymamy ciało jednolite, a więc w pierwszym wypadku samą wodę ciekłą, a w drugim wypadku sam

lód, temperatura wody zaczyna wzrastać lub temperatura lodu spadać. Fakt ten: stałość temperatury, wyrażamy krótko, mówiąc, że lód topi się przy temperaturze zero, albo że woda zamarza przy temperaturze zero, albo jeszcze, że temperatura 0°C. jest punktem tajania lodu lub zamarzania wody.

Doświadczenie uczy, że w podobny sposób, jak mieszanina lodu i wody ciekłej, zachowuje się każda mieszanina, złożona z części stałej i części płynnej jednej i tej samej substancyi. Mianowicie, termometr, zanurzony w taką mieszaninę, wskazuje niezmiennie jedną i tę samą temperaturę dopóty, dopóki nie roztopi się ostatni kawałek ciała stałego, jeżeli mieszaninę ogrzewamy, i dopóki nie zakrzepnie ostatnia kropla cieczy, jeżeli mieszaninę oziębiamy. Tę stałą temperaturę nazywamy punktem topienia się danego ciała stałego albo punktem krzepnięcia danej cieczy. Oto są punkty topienia się, względnie punkty krzepnięcia, niektórych ciał.

Iryd	1950°C.
Platyna	1800
Żelazo	1500
Miedź	1100
Złoto	1050
Ołów	330
Cyna	230

Siarka	112
Stearyna	60
Szmalec	35
Lód	0
Terpentyna	—10
Rtęć	—38,5
Eter siarczany	—90
Alkohol	—130

§ 12. **Ciepło utajone topienia się.** Widzieliśmy (§ 11), że ciepło, dostarczane ciału przez cały czas, przez który trwa proces topienia się, ginie niejako dla termometru, który nie wykazuje żadnej zmiany w temperaturze mieszaniny. Ciepło to zostaje zużyte na przeprowadzenie danego ciała ze stanu skupienia stałego w stan ciekły i zostaje jakgdyby utajone w otrzymanej cieczy. Liczbę kaloryi gramowych, które idą na stopienie jednego grama danego ciała, nazywamy *ciepłem utajonem topienia się* tego ciała. Przekonano się, że ciepło to wynosi: dla lodu 80 kaloryi, dla cynku 28 kaloryi, dla ołowiu 5,5 kal., dla rtęci 2,82 kaloryi; znaczy to, innemi słowy, że zamiana każdego grama lodu (o temperaturze 0^0) na wodę ciekłą (również o temperaturze 0^0) 80 kaloryi, że zamiana każdego grama cynku stałego na ciekły wymaga 28 kaloryi itd.

Odwrotnie, przy oziębianiu ciała, przez cały czas, przez który trwa proces krzepnięcia, chłodne otoczenie pochłania to ciepło, które znajdo-

wało się w cieczy w stanie utajonym. Ciepła tego uwalnia się, tj. wydziela się z danego ciała, ściśle taka sama ilość, jaka poprzednio poszła była na przeprowadzenie tego ciała ze stanu stałego w stan ciekły. Gdy więc woda marznie, to z każdego jej grama wydziela się 80 kaloryi ciepła, które rozchodzi się po otaczającem powietrzu; podobnież, każdy gram krzepnącego cynku wydziela 28 kaloryi, gram ołowiu 5,5 kaloryi itd. Jednem słowem wszystko odbywa się tak, jak gdyby ciepło utajone, pobrane przez ciało podczas topienia się, wyzwalało się napowrót podczas krzepnięcia czyli zestalania się.

§ 13. **Mieszaniny oziębiające. Przechłodzenie.** Przez zmieszanie jednej części soli kuchennej z trzema częściami lodu o temperaturze 0°C. otrzymuje się roztwór soli, który wykazuje temperatuę — 20°C. Przyczyna tak silnego oziębienia się roztworu leży tu głównie w tem, że wskutek znacznej wielkości ciepła utajonego topienia się lodu, ogromna ilość ciepła zostaje pobrana z roztworu dla roztopienia tego lodu. Tego rodzaju własności posiada wiele innych mieszanin, które nazywamy wskutek tego mieszaninami oziębiającemi.

Woda czysta, pozbawiona powietrza i pozostawiona w zupełnym spokoju, może utrzymać się w stanie ciekłym przy temperaturze, dochodzącej do 10 stopni poniżej zera; wystarcza je-

dnak najmniejsze wstrząśnienie, by taka woda przechłodzona zamarzła w mgnieniu oka, przyczem termometr podnosi się odrazu do 0°C.

§ 14. **Zmiana objętości ciał przy topieniu się.** Ogromna większość ciał przyrody rozszerza się, przechodząc ze stanu skupienia stałego w stan ciekły, i kurczy się przy przejściu odwrotnem. Woda, przeciwnie, rozszerza się przy zamarzaniu, tak iż lód zajmuje objętość o 10% większą od objętości wody, z której powstał; innemi słowy, jest on o 10% lżejszy od wody. Tak samo zachowuje się surowiec, który wskutek tego po odlaniu tak doskonale wypełnia najmniejsze wklęsłości w formach.

§ 15. **Topienie się pod zwiększonem ciśnieniem.** Zwiększone (w porównaniu z normalnem) ciśnienie ułatwia nieco topienie się takich ciał stałych, które kurczą się przy przechodzeniu w stan ciekły,a natomiast utrudnia topienie się takich ciał, które rozszerzają się przy tem przejściu. Pod zwiększonem ciśnieniem ciała 1-ej kategoryi topią się przy temperaturach niższych, aniżeli pod ciśnieniem normalnem; ciała 2-ej kategoryi, przeciwnie, wymagają temperatur wyższych. Ten wpływ ciśnienia na temperaturę topienia się jest w warunkach zwyczajnych znikomo mały, tak, iż usuwa się z pod wszelkiej kontroli, i zarysowuje się wyraźnie dopiero przy ciśnieniach olbrzymich. Lód, jako

ciało należące do pierwszej kategoryi, topi się pod zwiększonem ciśnieniem przy temperaturze, niższej od zera. Obliczono, że zwiększenie ciśnienia o jedną atmosferę odpowiada obniżeniu się punktu tajania o mniej niż jedną setną stopnia skali stustopniowej. Pod ciśnieniem kilku tysięcy atmosfer lód, jak stwierdza doświadczenie, topi się już przy 20 stopniach poniżej zera.

§ 16. **O tworzeniu się pary w próżni.** Weźmy szereg równolegle ustawionych barometrów, które dla dogodności mogą posiadać wspólną miseczkę, jak to widzimy na fig. 2., gdzie wszystkie 4 rurki barometryczne **A**, **B**, **C** i **D** zanurzone są w jedną i tą samą wanienkę z rtęcią. Rzecz prosta, że w warunkach zwyczajnych we wszystkich tych barometrach rtęć będzie stała na jednym i tym samym poziomie, równoważąc jedno i to samo ciśnienie zewnętrzne, mianowicie ciśnienie atmosferyczne. Niech wysokość słupa rtęci, którą widzimy na rysunku w rurce **A**, będzie wysokością barometryczną, w danej chwili równą np. 75 cm., i niech przytem temperatura wynosi 20°C. Pozostawiając rurce **A** charakter zwykłego barometru, wprowadźmy do próżni Torricellego pozostałych trzech rurek: **B**, **C** i **D** odpowied-



Fig. 2

nio niewielkie ilości: wody, alkoholu i eteru (Uskuteczniamy to w taki sposób, że, napełniwszy daną cieczą pipetkę z zagiętym do góry dzióbkiem, podsuwamy ten dzióbek od dołu pod sam wylot rurki barometrycznej; ciecz, jako lżejsza od rtęci, wypływa na jej powierzchnię w próżni Torricellego). Z chwilą ukazania się cieczy nad meniskami rtęci, następuje obniżenie się słupów rtęci we wszystkich trzech rurkach: w rurce **B** o 1,7 centymetra, w rurce **C** o 4,4 cm., w rurce **D** o 43 cm.

Przyczyna tego zjawiska jest następująca: w próżni parowanie cieczy odbywa się niezmiernie szybko w każdej temperaturze; wskutek tego całe wnętrze rurki wypełnia się w jednej chwili parą, która, jako ciało gazowe, wywiera pewne ciśnienie na ścianki naczynia, usiłując zepchnąć, czyli zniżyć słup rtęci; równowaga następuje dopiero wtedy, gdy suma dwóch ciśnień: jednego, wywieranego przez parę, i drugiego, wywieranego przez pozostałą część słupa rtęci, zrówna się z zewnętrznem ciśnieniem atmosferycznym. Można powiedzieć, że ciśnienie pary, zawartej teraz w dawnej próżni Torricellego, spełnia zastępczo funkcye wypchniętej części słupa rtęci, i z wielkości obniżenia tego słupa wnioskować o wielkości ciśnienna pary, zawartej w przestrzeni nad rtęcią. Tym sposobem, wykonywane przez nas doświadczenie nietylko wskazuje ogólnikowo, że

ciśnienie pary alkoholu jest większe od ciśnienia przy wodnej,a mniejsze od ciśnienia pary eteru, lecz nadto pozwala nam zmierzyć faktycznie wszystkie te trzy ciśnienia: okazuje się, że ciśnienie pary wodnej równa się ciśnieniu słupa rtęci, wysokiego na 1,7 cm.; ciśnienie pary alkoholu — ciśnieniu słupa, wysokiego na 4,4 cm., i wreszcie ciśnienie pary eteru — ciśnieniu słupa wysokiego 43 cm. — to wszystko przy temperaturze 20°C.

§ 17. **Para nasycona i para nienasycona.** W opisanem doświadczeniu, w każdej rurce mieliśmy oprócz pary, jeszcze nieco cieczy nad rtęcią. Para, zawarta w zamkniętej przestrzeni i znajdująca się w zetknięciu z mniejszą lub większą ilością własnej swojej cieczy, nosi miano pary nasycającej przestrzeń, albo, pary nasyconej i posiada tę godną uwagi własność, że przy każdej danej temperaturze wywiera pewne ściśle określone ciśnienie, zwane ciśnieiniem nasycenia, a zupełnie niezależne od objętości, którą pozwalamy jej objąć. A zatem, para nasycona zachowuje się całkiem inaczej, aniżeli gaz zwyczajny, którego ciśnienie znajduje się, jak wiemy, w ścisłej zależności od zajmowanej objętości.

Rozpatrzmy nieco dokładniej zachowywanie się pary nasyconej.

Weźmy np. parę nasyconą w rurce **B**. Przy temperaturze 20°C. para taka posiada pewną określoną gęstość, a jej ciśnienie nasycenia równa się jak widzieliśmy 17 milimetrom rtęci. Jeżeli zmniejszymy objętość, zajmowaną przez tę parę, wtłaczając np. rurkę wgłąb miseczki (w tym celu należy wziąć miseczkę głębszą niż ta, którą widzimy na fig. 2), to część pary skropli się t. j. zamieni się na ciecz, ale zarówno gęstość tej pary, jak i jej ciśnienie pozostaną bez zmiany. I odwrotnie, jeżeli, unosząc rurkę do góry, zwększymy przestrzeń dostępną dla pary, to wytworzy się nowa ilość tej pary, ale znowu ani gęstość jej, ani ciśnienie nie ulegną żadnej zmianie, o ile tylko nie zmienimy przytem temperatury.

Ze wzrastaniem temperatury pary nasyconej wzrasta ogromnie szybko jej gęstość i wywierane przez nią ciśnienie: przy 30°C. ciśnienie nasycenia wynosi dla pary wodnej 31 mm. rtęci, przy 50°C. — 92 mm.; przy 100°C. — 760 mm., czyli jedną atmosferę; przy 120°C. już 2 atmosfery; a przy 180°C. — 10 atmosfer. Oto tablica, wykazujące zależność pomiędzy temperaturą a ciśnieniem nasycenia pary wodnej.

Temperatura	Ciśnienie w mm. rtęci
— 10°C	2,15
— 5	3,16
0°	4,57
10°	9,14
20°C	17, 3
30	31, 5
40	54, 8
50	91, 9
60	148, 8
70	233, 3
100	760, 0

Temperatura	Ciśnienie w atmosferach
100°C	1
120	2
134	3
160	6
180 ...	10
200	15
230	28

U wielu innych cieczy stwierdzilibyśmy niemniej szybki wzrost ciśnienia pary z temperaturą.

Im bardziej zwiększać będziemy przestrzeń,

zaofiarowaną nasyconej parze w rurce B, tem większa ilość cieczy przechodzić będzie w stan gazowy, aż wreszcie przyjdzie chwila, kiedy wszystka woda nad rtęcią zamieni się na parę o ciśnieniu 17 mm. Jeżeli w owej chwili powiększymy jeszcze przestrzeń, dostępną dla pary, to para ta przestanie być nasyconą i zacznie się zachowywać pod względem ciśnienia swego, jak gaz, tj. ciśnienie jej stanie się odtąd odwrotnie proporcyonalnem do zajmowanej przez nią objętości.

Ten sam rezultat, tj. zamianę pary nasyconej na parę nienasyconą, można otrzymać i na innej drodze. Im wyżej będziemy podnosili temperaturę pary nasyconej w rurce B, tem bardziej wraz z ciśnieniem wzrastać będzie gęstość tej pary, tem więcej więc cieczy pójdzie na jej wytworzenie, aż wreszcie przy pewnej temperaturze ostatnia kropla wpuszczonej wody zamieni się na parę, które przy dalszem ogrzewaniu przestanie już być nasyconą (albowiem przy tej wyższej temperaturze stałaby się gęstszą, gdyby mogła jeszcze zaczerpnąć materyały z cieczy) i zacznie ulegać prawu Boyle'a-Mariotte'a (II, § 18).

Odwrotne zjawisko występuje przy zmniejszaniu objętości pary nasyconej oraz przy jej oziębianiu: w obu wypadkach określone ilości pary skraplają się, lecz pozostała część jej nie zmienia ani swej gęstości, ani swego ciśnienia.

Aby lepiej oswoić się z właściwościami obu rodzajów pary, rozpatrzmy jeszcze przykład następujący.

Wyobraźmy sobie, że mamy gram pary wodnej stustopniowej, zamkniętej w walcu o objętości 6,8 litrów tj. 6800 cm.^{3} Ponieważ dla pary wodnej stustopniowej ciśnienie nasycenia rówia się 1 atmosferze, a skądinąd wiadomo (§ 19), że pod ciśnieniem jednej atmosfery gram takiej pary zajmuje tylko 1700 cm.^{3}, przeto rzecz jasna, że para w naszym walcu, mając do swego rozporządzenia przestrzeń większą od 1750 cm.^{3}, nie będzie parą nasycona, a ciśnienie jej będzie mniejsze od ciśnienia jednej atmosfery, mianowicie równe

$\frac{1750}{6800}=\frac{1}{4}$ atmosfery (prawo Boyle'a-Mariotte'a). Jeżeli, nie zniżając temperatury pary, zaczniemy zmniejszać jej objętość (wtłaczając np. tłok wgłąb walca), to para nasza, jako nienasycona, zachowywać się będzie jak zwykły gaz, tj. ciśninie jej będzie się zmieniało podług prawa Boyle'a-Mariotte'a, a zatem wzrośnie do połowy atmosfery,gdy zmniejszymy objętość walca do 3400 cm.^{3}, i dojdzie do całej atmosfery, gdy objętość ta spadnie do 1700 cm.^{3} W owej chwili para staje nasyconą, ciśnienie bowiem jednej atmosfery jest dla niej, jak wiemy, ciśnieniem nasycenia, i odtąd dalsze

zmniejszanie objętości walca będzie miało ten tylko skutek, że coraz to większa ilość pary ulegać będzie skropleniu, przyczem zarówno gęstość pozostałej pary, jak i ciśnienie pozostaną niezmiennemi. W ten sposób, zmniejszając objętość walca aż do objętości jednego centymetra sześciennego, możemy wszystką parę zamienić na wodę stustopniową (gram wody stustopniowej zajmuje objętość mało co większą od centymetra sześć.; rozszerzalność bowiem wody jest bardzo nieznaczna). I odwrotnie, wyciągając teraz tłok z walca, wywołamy tworzenie sę coraz to nowych ilości pary stustopniowej, która posiadać będzie stałe ciśnienie nasycenia, równe jednej atmosferze dopóty, dopóki nie przekroczymy objętości 1700 cm.^{3} Od tej chwili para przestaje być nasyconą, gęstość jej zaczyna maleć, a jednocześnie maleje i ciśnienie podług prawa Boyle'a-Mariotte'a, tak iż, powróciwszy do objętości 6800 cm.^{3}, będziemy mieli w walcu parę o ciśnieniu w czwórnasób mniejszem od ciśnienia jednej atmosfery.

Jeżeli, zamiast zmniejszać objętość naszego walca, zawierającego gram pary stustopniowej, zaczniemy go oziębiać,to możemy również dojść do skroplenia.Przypuśćmy np., żeśmy parę oziębili do 50°C.Gram pary 50stopniowej nasyconej zajmuje objętość 12000 cm.^{3} (około; porównaj § 19), a ponieważ cały walec mieści tylko 6800 cm.^{3}, przeto 52 cm.^{3} pary musi się skroplić, zaś

pozostałe 68 cm^3. wypełniać będą walec, wywierając ciśnienie, równe 92 mm. rtęci (str. 41).

§ 18. **O tworzeniu się pary w przestrzeni, zawierającej powietrze.** W przestrzeni, zawierającej powietrze, parowanie cieczy odbywa się tem wolniej, im większe jest ciśnienie tego powietrza, ale ostateczna ilość pary, mogącej się pomieścić, jest taka sama, jak w przestrzeni, pozbawionej powietrza;i w jednym bowiem i w drugim wypadku parowanie ustaje wtedy, gdy ciśnienie wywierane przez samą tylko parę, stanie się równem jej ciśnieniu nasycenia.

§ 19. **Gęstość pary.** Gęstością pary względem powietrza nazywamy stosunek pomiędzy ciężarem pewnej objętości tej pary, a ciężarem tej samej objętości powietrza, znajdującego się pod tem samym ciśnieniem i w tej samej temperaturze, co i dana para.

Gęstość pary wodnej względem powietrza równa się 0,622. Wiemy (II § 14), że w temperaturze 0^0 i pod ciśnieniem jednej atmosfery gram powietrza zajmuje 773 cm^3. Z podniesieniem temperatury do 100^0 bez zmiany ciśnienia objętość ta, na mocy prawa Gay-Lussaca, wzrośnie do

$$773\left(1+\frac{100}{273}\right)=1056 \text{ cm}^3.$$

Ta ostatnia objętość, zajęta, zamiast przez powietrze, przez parę stustopniową, znajdującą się pod ciśnieniem je-

dnej atmosfery, ważyć będzie tylko 0,622 grama, skąd wynika, że gram takiej pary zajmować będzie objętość 1056:0,622=(około) 1700 cm^3.

§ 20. **O wrzeniu.** Powiadamy o cieczy, że w r e lub gotuje się, jeżeli para wytwarza się w samej masie cieczy w postaci pęcherzyków, które wydostają się na powierzchnie z mniejszą lub większą gwałtownością. Wrzenie może rozpocząć się dopiero wtedy, gdy temperatura cieczy wzrośnie o tyle, że ciśnienie nasycenia jej pary zrówna się z ciśnieniem, wywieranem przez atmosferę. Temperatura, przy której następuje takie zrównanie, nazywa się punktem wrzenia danej cieczy*) pod danem ciśnieniem. Im większe jest ciśnienie atmosferyczne, tem wyżej leży punkt wrzenia, tj. tem wyższą temperaturę musi posiadać ciecz, żeby módz się zagotować; im mniejsze jest ciśnienie tem niżej leży punkt wrzenia. Oto są punkty wrzenia niektórych ciał pod ciśnieniem normalnem.

Eter etylowy	35°C
Alkohol etylowy	78

*) Dla ścisłości należy zauważyć, że w samej masie gotującej się cieczy panuje zazwyczaj temperatura nieco wyższa od określonego w powyższy sposób punktu wrzenia, i tylko para, wywiązująca się z cieczy, posiada temperaturę ściśle teoretyczną (porównaj § 2).

Benzyna	80
Woda	100
Rtęć	357
Siarka	450
Cynk	1000

§ 21. **Ciepło utajone parowania.** Od chwili, gdy się rozpoczęło wrzenie, temperatura cieczy utrzymuje się stale na jednym i tym samym poziomie. Podobnie jak to było przy topieniu się, cała ilość ciepła, dostarczona ciału podczas wrzenia, ginie dla termometru, idzie bowiem na przeprowadzenie ciała ze stanu skupienia ciekłego w stan skupienia gazowy i zostaje jak gdyby utajona w powstającej parze.

Liczbę kaloryi gramowych, które trzeba zużyć na odparowanie jednego grama ciała przy pewnej określonej tempeaturze, nazywamy c i e p ł e m u t a j o n e m p a r o w a n i a tego ciała przy danej temperaturze.

Dla wody przy temperaturze 100°C. ciepło to wynosi 536 kaloryi; to znaczy, że dla zamiany wody stustopniowej na parę stustopniową trzeba wodzie tej dostarczyć 536 kaloryi. Przy skraplaniu ciepło utajone zostaje jak gdyby uwolnione i pochłonięte przez otoczenie.

Para 100-stopniowa, powstała z grama wody, zajmuje pod ciśnieniem jednej atmosfery objętość około 1700 razy większą od objętości, którą zajmował gram wody, skąd wynika, że, tworząc się, para ta musi niejako rozsuwać na

wszystkie strony otaczające powietrze wbrew ciśnieniu atmosferycznemu, czyli wykonywać pracę. Praca ta odbywa się kosztem ciepła, dostarczanego wodzie. Obliczono wszakże, że na tę pracę "rozsuwania" powietrza, zwaną pracą zewnętrzną, idzie ilość ciepła, nie przenosząca 1|10 części całego ciepła utajonego parowania, pozostałe 9|1 części stanowią przyrost tak zwanej energii wewnętrznej pary. W teoryi kinetycznej gazów (II § 22) przypuszczamy, że znaczna część tego przyrostu polega na rozsunięciu cząsteczek wody jednych od drugich wbrew wzajemnym przyciąganiom tych cząsteczek, tj. na uskutecznieniu czynności w rodzaju napięcia błony kauczkowej.

§ 22. **O wytwarzaniu się pary w naczyniach zamkniętych.** Z tego, co było mówione o wrzeniu, wynika bezpośrednio, że w naczyniu otwartem, tj. łączącem się z atmosferą zewnętrzną, nie można nigdy otrzymać wody, goretszej nad 100°C., ani też ciśnienia pary wodnej, wyższego nad 1 atmosferę (nie bierzemy tu, rzecz prosta, pod uwagę drobnej przewyżki, która może wyniknąć z wysokiego stanu barometrycznego). Inna rzecz w naczyniu, zamkniętem hermetycznie, w którem, w miarę nagromadzenia się pary, wzrasta ciśnienie, wywierane przez nią na powierzchnię cieczy. W naczyniu takiem, np. w kotle maszyny parowej,

przestrzeń, znajdująca się nad powierzchnią wody, jest zawsze wypełniona parą nasyconą, wskutek czego właściwe wrzenie jest wykluczone. Natomiast, w miarę dopływu ciepła z paleniska, wzrastają jednocześnie: temperatura wody i ciśnienie pary, której za każdem podniesieniem się temperatury przybywa tylko tyle, ile jej dodatkowo zmieścić się może wobec jednoczesnego podniesienia się ciśnienia nasycenia. Tak np. jednocześnie z podniesieniem się temperatury wody od 100°C. do 120°C., ciśnienie pary wzrasta od 1 atmosfery do 2atm., a to wskutek wytworzenia się w kotle dodatkowej ilości pary — wytworzenia się, umożliwionego przez wzrost temperatury. Przy 150°C. ciśnienie pary wynosić będzie 4½ atmosfery, przy 175°C. 8 atmosfer itd.

§ 23. **Skraplanie gazów.** Wobec tego, że pary nienasycone zachowują się na podobieństwo gazów, można zapytać, czy gazy zwykłe nie są również parami nienasyconemi pewnych substancyi, które, znalazłszy się w innych warunkach, mogłyby być cieczami lub nawet ciałami stałemi. Doświadczenie odpowiada twierdząco na to pytanie, a zadanie o skraplaniu par prowadzi bezpośrednio do zadania o o skraplaniu gazów, względnie do otrzymywania tych ciał w stanie stałym.

Widzieliśmy, że dwie drogi prowadzą do skraplania pary: z m n i e j s z e n i e o b j ę-

tości i obniżanie temperatury, czyli zwiększanie ciśnienia i oziębianie. Przy użyciu bądź jednego bądź drugiego sposobu, bądź wreszcie obu sposobów jednocześnie, fizykom udało się do roku 1877 skroplić wszystkie gazy z wyjątkiem 6 (wśród tych ostatnich były tlen, azot i wodór), które opierały się do owego czasu wszelkim usiłowaniom.

Powodem tych niepowodzeń była nieznajomość następującego faktu. Wogóle, zauważono oddawna, że im niższa jest temperatura gazu, tem mniejsze ciśnienie wystarcza do jego skroplenia, ale nie wiedziano tego, że dla każdego gazu istnieje pewna ściśle określona temperatura, poniżej której nie daje on się skroplić pod najsilniejszem nawet ciśnieniem. Taki np. bezwodnk węglany skrapla się względnie łatwo, tak iż przy temperaturze 15^{0}C. skroplenie jego nie wymaga ciśnienia większego nad 10 atmosfer. Ale spróbujmy ogrzać go do 31^{0}C., a najpotężniejsze ciśnienia, wynoszące kilka tysięcy atmosfer, nie zdołają zamienić gazu tego na ciecz.

Temperatura, poniżej której skroplenie gazu przestaje być możliwe, bez względu na wysokość wywieranego ciśnienia, nosi miano temperatury krytycznej dla danej substancyi.

Temperatura krytyczna bezwodnika węgla-

nego wynosi zatem 31°C. Oto są temperatury krytyczne niektórych substancyi.

Bezwodnik węglany	3,1°C.
Etylon	13
Tlen	—118
Azot	—446
Wodór	—242

Wobec tych danych nie będziemy się dziwili, że niektórym uczonym nie udawało się skroplić tlenu nawet pod ciśnieniem kilku tysięcy atmosfer, gdy tymczasem Cailletet (1877) otrzymał gaz ten w stanie drobniutkich kropelek już pod ciśnieniem 300 atmosfer, lecz za to przy oziębieniu dochodzącym do — 200°C. Wypada zaznaczyć, że w tej dziedzinie badań wszechświatowy rozgłos zyskali sobie dwaj nasi rodacy, profesorowie Wróblewski i Olszewski, którzy, zastosowawszy pewne udoskonalenia, pierwsi otrzymali (1883) tlen i azot w stanie rzeczywiście ciekłej masy, nie zaś przemijającego obłoczku, jak Cailletet. W roku 1899 Dewar otrzymał wodór w stanie ciekłym i w stanie stałym, a na parę lat przedtem Linde i Hampson wynaleźli jednocześnie przyrządy do fabrycznego wyrobu ciekłego powietrza.

§ 24. **Wilgotność powietrza.** Powietrze

atmosferyczne, nawet najsuchsze, zawiera stale pewną ilość pary wodnej, która w warunkach zwyczajnych bywa mniej lub więcej oddalona od stanu nasycenia (§ 17). Wilgotnością danego powietrza nazywamy stosunek pomiędzy ilością pary wodnej, która jest w niem faktycznie zawarta, a tą jej ilością, która jest niezbędną do nasycenia takiej samej objętości powietrza przy tej samej temperaturze. Tym sposobem o wilgotności powietrza rozstrzyga nie bezwzględna ilość zawartej w niem pary wodnej, lecz większa lub mniejsza blizkość jej do stanu nasycenia: powietrze chłodne, zawierające mniejszą ilość wody, może posiadać wilgotność większą, niż powietrze ciepłe, zawierające wększą ilość wody, pierwszemu bowiem wystarcza do nasycenia mała ilość wody, gdy tymczasem dla nasycenia drugiego potrzebna jest ilość wody o wiele większa.

Ponieważ para, nie nasycająca przestrzeni, ulega narówni ze zwykłymi gazami paru Boyle'a-Mariotte'a, przeto ciśnienie pary wodnej, zawierającej się przy pewnej temperaturze w pewnej objętości powietrza, jest proporcyonalne do masy tej pary. Stąd wynika, że w podanem

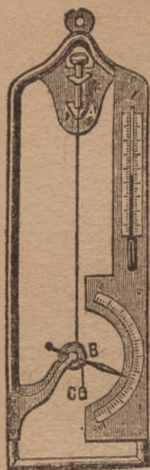


Fig. 3

określeniu wilgotności można zastąpić dwie masy pary dwoma jej ciśnieniami i powiedzieć, że wilgotność jest to stosunek pomiędzy ciśnieniem, które posiada para wodna, faktycznie zawierająca się w danem powietrzu, a jej ciśnieniem nasycenia tj. ciśnieniem, któreby posiadała, gdyby nasycała przestrzeń.

§ 25. **Higrometry.** Przyrządy, służące do określania wilgotności, noszą nazwę higrometrów. Działanie ich bywa oparte na zasadach bardzo rozmaitych: w niektórych higrometrach mierzy się wpost ilość pary (masę), zawierającej się w danej objętości powietrza; w innych — ciśnienie tej pary. Bardzo praktycznym, aczkolwiek niezbyt dokładnym, jest higrometr włosowy de Saussure'a (fig. 3); działanie tego przyrządu oparte jest na zachowywaniu się odtłuszczonego włosa, który wydłuża się w powietrzu wilgotnem, a kurczy się w suchem. Tym sposobem z długości włosa, odpowiednio zawieszonego i połączonego u dołu z wskazówką B, możemy wnioskować o mniejszej lub większej zawartości pary wodnej w powietrzu.

III.

O ROZCHODZENIU SIĘ CIEPŁA.

§ 26. **Przewodzenie i promieniowanie..** W ośrodku nieruchomym ciepło może przenosić się z miejsca na miejsce w sposób dwojaki: przez przewodzenie i przez promieniowanie. W perwszym wypadku przenosi się ono zawsze z miejsca o temperaturze wyższej do miejsca o temperaturze niższej; jeżeli wstawimy w płomień koniec pręta żelaznego, to ciepło zacznie "płynąć" ku drugiemu końcowi, przyczem każdy punkt pręta, położony bliżej źródła, będzie zawsze posiadał temperaturę wyższą, aniżeli punkt sąsiedni, położony dalej od źródła: ciepło jest tu przewodzone przez żelazo.

W drugim wypadku ciepło, "wypromieniowywane" przez źródło, może przenikać do ciała, położonego zdala od tego źródła, poprzez ciało, znajdujące się bliżej źródła, nie ogrzewając prawie wcale tego bliższego ciała, tak iż w ostatecznym wyniku można powiedzieć, że ciepło przechodzi w takich razach z ciała zimniejszego do ciała cieplejszego. Tak np. zimową porą termometr nieraz wskazuje w

słońcu kilka stopni ciepła, pomimo, że temperatura powietrza, przez które przechodzą promienie słoneczne, zanim dosięgną termometru, wynosi kilka stopni mrozu. Podobnież, stanąwszy w pobliżu rozpalonego pieca, możemy uczuwać nieznośne gorąco, pomimo że powietrze, dzielące nas od rozgrzanej powierzchni jest zupełnie chłodne.

Promieniowanie ciepła przedstawia uderzające analogie z promieniowaniem światła i odbywa się według tych samych praw zasadniczych: Prawami temi zajmiemy się, gdy będziemy mówili o zjawiskach świetlnych. Tutaj zaznaczymy tylko, że takie ciepło "promieniste" nietylko nie potrzebuje do rozchodzenia się swego żadnego podścieliska ze zwykłej materyi, lecz nawet rozchodzi się tem swobodniej, im mniej takiej materyi znajduje na swej drodze.

§ 27. **Przewodnictwo cieplne.** Doświadczenie uczy, że przepływ ciepła z jednego miejsca do drugiego odbywa się w różnych ciałach niejednakowo prędko. Powiadamy, że różne ciała posiadają różne przewodnictwo cieplne: jedne z nich, jak np. metale, są dobrymi przewodnikami, albowiem ciepło płynie przez nie prędko; inne natomiast, jak np. korek lub wełna, są złymi przewodnikami, albowiem ciepło płynie przez nie powoli.

Bezwzględnie najlepszym przewodnikiem jest

srebro, gorszym już nieco miedź; żelazo przewodzi bez porównania gorzej od miedzi, nowe srebro jeszcze gorzej, niż żelazo. Wstawiwszy do szklanki z wodą gorącą dwie łyżeczki: srebrną i nejzylbrową, przekonamy się, że pierwsza parzy palce, gdy druga jest zaledwie letnia; przepływ ciepła odbywa się w tej ostatniej o tyle powoli, że zanim nadejdzie nowy jego transport, zdąża ona znaczną część dawnego odstąpić otaczającemu powietrzu.

Ciecze są na ogół bardzo nieszczęgólnymi przewodnikami, i ogrzewanie ich w warunkach zwyczajnych, np. w rondlu na blasze, odbywa się przeważnie nie przez przewodzenie ciepła lecz drogą konwekcyi, tj. unoszenia ciepła przez poruszające się cząstki cieczy. Wskutek tego ciecz, ogrzewana od spodu, ogrzewa się względnie prędko, ogrzane bowiem cząstki dolne, jako lżejsze, dążą do góry, unosząc ze sobą ciepło, a jednocześnie cząstki warstw górnych, jako cięższe, opadają na dół. Natomiast ciecz, wystawiona na działanie ciepła od góry, ogrzewa się bardzo powoli, ponieważ niema w niej owych prądów konwekcyjnych.

Przewodnictwo cieplne gazów jest na ogół jeszcze słabsze, aniżeli przewodnictwo cieczy; i tutaj główną rolę przy ogrzewaniu grają prądy konwencyjne, wskutek których coraz to nowe cząsteczki gazu stykają się ze źródłem ciepła. Gdzie niema tych prądów, tam ciepło przepły-

wa przez gaz z niezmierną powolnością. Unieruchomiona masa gazowa jest bardzo złym przewodnikiem. Ciała takie jak futra, wełna, puch itp., zawdzięczają swe własności grzejące, albo raczej zatrzymujące ciepło, nie czemu innemu, jak warstwie powietrza, unieruchomionej pomiędzy włóknami.



IV.

TERMODYNAMIKA.

§ 28. **Doświadczenie Roberta Mayera.** Wyobraźmy sobie gram powietrza o temperaturze 0^0C., zamkniętego w rurce cylindrycznej o przekroju poprzecznym, równym np. 10 cm.^{2}, długiej na metr i zaopatrzonej w tłok ruchomy, mogący przesuwać się we wnętrzu prawie bez tarcia. Przypuśćmy, że podczas doświadczenia, które zamierzamy zrobić, ciśnienie atmosferyczne równa się dokładnie jednej atmosferze. Ponieważ przy temperaturze 0^0C. i pod ciśnieniem jednej atmosfery gram powietrza zajmuje, jak wiadomo, objętość 773 cm^3, przeto tłok, zamykający nasze powietrze, stać będzie w odległości 77,3 cm. od dna rurki. Ogrzejmy to zamknięte powietrze o 1^0C. Cóż nastąpi? Powietrze rozszerzy się o $\frac{1}{273}$ część swojej pierwotnej objętości tj. o $\frac{773}{273}=2{,}8$ cm.^{3} i wskutek tego przesunie tłok w rurce o 0,28 cm. wbrew ciśnieniu zewnętrzne-

mu, przyczem ciśnienie w rurce pozostanie równem temu ciśnieniu zewnętrznemu, tj. jednej atmosferze. Jeżeli określimy doświadczalnie ilość ciepła, którą pobrał nasz gram powietrza podczas tego ogrzewania się, połączonego z rozszerzaniem się, to okaże się, że wynosi ona 0,237 małych kaloryi; wynik ten wyrażamy, mówiąc, że ciepło właściwe powietrza przy stałem ciśnieniu równa się 0,237.

Powtórzmy doświadczenie w warunkach zmienionych; mianowicie, przed rozpoczęciem ogrzewania, umocujmy tłok nieruchomo. Powietrze, ogrzewając się, dążyć będzie i teraz do rozszerzania się, lecz, nie mogąc powiększyć swej objętości z powodu nieruchomości tłoka, zwiększy natomiast swe ciśnienie o $\frac{1}{273}$ część ciśnienia pierwotnego, tj. o $\frac{1}{273}$ część atmosfery. Jeżeli zmierzymy ilość ciepła, które w tem nowem doświadczeniu poszło na ogrzanie naszego grama powietrza o 1^0C., to otrzymamy liczbę 0,17 kaloryi, która przedstawia to, co nazywamy ciepłem właściwem powietrza przy stałej objętości i jest, jak widzimy, znacznie mniejsza od liczby 0,237, wyrażającej ciepło właściwe powietrza przy stałem ciśnieniu. Okazuje się więc, że powietrze znajdujące się

pod ciśnieniem stałem, a przeto mogące zmieniać tylko swą objętość, daje się ogrzewać znacznie trudniej, aniżeli powietrze, utrzymywane przy stałej objętości, a więc mogące zmieniać tylko swe ciśnienie.

Zastanawiając się nad tą różnicą w ilości ciepła, potrzebnego do ogrzania powietrza w jednym i drugim wypadku, Robert Mayer (1842) doszedł do następującego poglądu: Ogrzanie powietrza przy stałem ciśnieniu wymaga większej ilości ciepła, aniżeli ogrzanie przy stałej objętości, dlatego, że w pierwszym razie zostaje wykonana praca mechaniczna, której niema w drugim; mianowicie powietrze siłą prężności swojej przesuwa tłok wbrew ciśnieniu atmosferycznemu. Na tę to pracę idzie owa przewyżka jednego ciepła właściwego nad drugiem, którą wykazuje doświadczenie; innemi słowy, przewyżka ta jest równoważnikiem wykonanej pracy mechanicznej.

Widzieliśmy, że przewyżka ta wynosi w kaloryach 0,237—0,170=0,067 kaloryi. Obliczmy teraz w kilogramometrach ilość pracy mechanicznej, powstałej zamiast powyższej ilości ciepła. Siła, którą rozszerzające się powietrze w rurce wywiera na powierzchnię tłoka, równa się sile 10×1,033 kilogramów (II § 2) i przesuwa tłok na przestrzeni 0,28 cm., tj. 0,0028 m., a zatem wykonywa pracę, równą 10×1,033×0,0028 =0,0289 kilogramometr. (I. § 26). Ponieważ

praca ta została wykonana kosztem 0,067 kaloryi, przeto na każdą zużytą kaloryę ciepła przypada

$$\frac{0,0289}{0,067} = 0,43$$ kgm. wykonanej pracy, a więc na każdą kaloryę 430 kgm.

§ 29. **Rozwój teoryi ciepła.** Że pewnym zjawiskom mechanicznym towarzyszy ukazywanie się ciepła, o tem wiedziano już w najgłębszej starożytności, nie mogło bowiem ujść uwagi najpierwotniejszego umysłu, że żelazo rozgrzewa się pod uderzeniami młota, a osie wozów nieraz zapalają się wskutek silnego tarcia. Działanie maszyny parowej, wynalezionej w drugiej połowie XVIII wieku, musiało naprowadzić na myśl, że, odwrotnie, ze zjawisk cieplnych można skorzystać, w celu wytwarzania zjawisk mechanicznych. Mimo to, do samego końca XVIII wieku, a nawet i później, uważano powszechnie ciepło za rodzaj materyi nieważkiej, która tworzyć się nie może, lecz może tylko wydzielać się z ciał przy okazyi pewnych zjawisk mechanicznych (tarcie) i której przechodzenie z jednych ciał do drugich może stanowić pobudkę do powstawania zjawisk mechanicznych (maszyna parowa).

Dopiero Davy, stopiwszy dwa kawałki lodu przez pocieranie jednego o drugi, stwierdził, że ciepło może faktycznie tworzyć się z ruchu wi-

docznego, tj. powstawać w miejscu ruchu widocznego, nie wyszedł jednak poza sformułowanie tego całkiem ogólnikowego twierdzenia.

W kilkanaście lat potem Carnot (1824) wypowiedział i uzasadnił doniosłe twierdzenie, że pomiędzy ciepłem a mechanicznymi jego skutkami zachodzi ścisła równoważność w tem znaczeniu, że dla otrzymania pewnej określonej ilości pracy mechanicznej trzeba zawsze przeprowadzić pewną ściśle określoną ilość ciepła z ciała cieplejszego do ciała zimniejszego, a więc np. gdy chodzi o maszynę parową — z kotła do oziębiacza. Twierdzenie to było iście gienialnym przebłyskiem prawdy, który rozświetlił cały widnokrąg badań nad stosunkiem pomiędzy ciepłem a pracą. Wprawdzie sam Carnot hołdował jeszcze dawnemu poglądowi i uważał ciepło za materyę nieważką, która nie może ani ginąć, ani się tworzyć, a tylko przenosi się z ciał cieplejszych do ciał zimniejszych, lecz mimo to, wprowadziwszy badanie na grunt ścisłych pomiarów, stworzył teoryę ciepła, o jeden krok tylko oddaloną od dzisiejszego poglądu, podług którego ciepło i praca faktycznie zamieniają się jedno na drugie, stanowiąc, jak się obecnie wyrażamy, d w i e r ó ż n e p o s t a c i e e n e r g i i.

Ten ostatni krok zrobili jednocześnie, choć całkiem niezależnie jeden od drugiego, Niemiec Robert Mayer i Anglik Joule. Przedstawiliśmy

już w ogólnym zarysie drogę, którą poszedł pierwszy z tych badaczów. Joule, raz powziąwszy myśl o ścisłej i bezwzględnej równoważności pomiędzy ilością pracy (zużytej lub otrzymanej) a ilością ciepła (otrzymanego lub zużytego), póty nie spoczął, póki przez najrozmaitsze dziedziny fizyki nie przeprowadził doświadczalnego na to dowodu· Opiszemy tu jedno z tych doświadczeń Joule'a, które, jako silnie przemawiające nawet do mało przygotowanego umysłu, stało się klasycznem i przeszło do wszystkich podręczników.

§ 30. **Doświadczenie Joule'a.** Na podmurowaniu stoi kalorymetr C (fig. 4), napełniony wodą, której temperaturę wskazuje zanurzony w nią termometr C. Środkiem tego kalorymetru przechodzi oś kołowrotka, umieszczonego w ramce, opartej na podmurowaniu. Dolna część tej osi zaopatrzona jest w szereg poprzecznych skrzydełek albo łopatek, a samo wnętrze kalorymetru — w kilka pionowych przegródek blaszanych z powycinanymi otworami,przez które mogą przechodzić obracając się skrzydełka. Na kołowrotek nawinięte są dwa sznurki w taki sposób, że, ciągnąc za nie w strony przeciwne, wywołuje się obrót kołowrotka a więc i skrzydełek; odwijając się z kołowrotka, sznurki te nawijają się na bloki a i b, obciążone za pośrednictwem innych sznurków gwichtami p i q, których spadanie wywołuje tym sposobem o-

brót bloków, a zatem i kołowrotka (zamiast urządzenia przedstawionego na fig. 4, możnaby

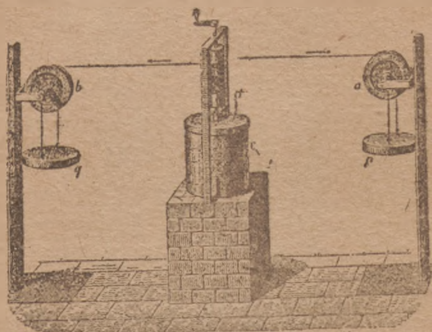


Fig. 4

sznurki, obciążone gwichtami, wprost przerzucić przez bloki a i b).

Na początku doświadczenia oba gwichty p i q podciągnięte są do góry, tak iż znajdują się tuż pod blokami a i b, przyczem cały przyrząd utrzymujemy w stanie spoczynku, przytrzymując np. ręką korbę kołowrotka. Zanotowawszy temperaturę, wskazywaną przez termometr t, puszczamy swobodnie korbę; gwichty p i q zaczynają spadać, wprowadzając w obrót bloki, a za niemi kołowrotek i układ skrzydełek, które zaczynają mieszać wodę, zawartą w kalorymetrze. Dzięki obecności przegródek tarcie pomiędzy wodą a skrzydełkami zostaje o tyle spotęgowane, że te ostatnie na podobieństwo kół, ściśniętych hamulcami, obracają się z trudnością, skutkiem czego i spadanie gwichtów od-

bywa się w tempie zwolnionem. Jednocześnie takie mieszanie wody wytwarza w niej ciepło, które podnosi jej temperaturę, tak, iż z chwilą, gdy gwichty dosięgną podłogi, termometr t wskazuje temperaturę wyższą, aniżeli na początku doświadczenia.

Rozpatrzmy się nieco bliżej w przebiegu tego doświadczenia. Gdyby gwichty spadały na podłogę swobodnie, to, jak wiemy (I, § 37) siła ciężkości wykonałaby na nich pewną pracę, przyczem gwichty utraciłyby energię potencyalną, którą posiadały dzięki wyniesieniu swemu nad pozom podłogi, a natomiast zyskałyby równą ilość energii kinetycznej, wskutek czego w chwili dosięgania ziemi wykazałyby odpowiednią prędkość. W doświadczeniu naszem sprawa przedstawia się całkiem inaczej: wprawdzie, znalazłszy się na dole, gwichty utraciły niewątpliwie energię potencyalną, lecz nie nabyły one prawie wcale energii kinetycznej, przybywają bowiem na podłogę z prędkością tak nieznaczną, że w rachunku przybliżonym możemy ją uważać za żadną.

Cóż więc się stało z utraconym przez gwichty zasobem energii potencyalnej?

Joule odpowiada: energia, utracona przez spadłe gwichty, nie zginęła bynajmniej, lecz zmieniła tylko swą postać i ukazuje się w kalorymetrze, jako ciepło, które podnosi temperaturę wody. Znając masę gwichtów i wysokość,

z której spadły, możemy znaleźć ilość pracy, wykonanej przez siłę ciężkości, a znając masę wody, zawartej w kalorymetrze, i liczbę stopni, o które podniósł się termometr t, możemy znaleźć ilość wytworzonego ciepła.

Spróbujmy przeprowadzić ten rachunek dla jednego z doświadczeń Joulea', w którym dwa gwichty, każdy o masie 13,16 kilogramów, spadły 20 razy zrzędu z wysokości 1,6 metra, przyczem temperatura wody w kalorymetrze, mieszczącym 6,31 kg., podniosła się o 0,31°C.

Energię potencyalną, utraconą przez spadłe gwichty, otrzymamy, mnożąc ciężar ich przez wysokość, co uczyni $20 \times 2 \times 13{,}16 \times 1{,}6 = 842{,}24$ kilogramometrów; ilość ciepła, wyrażoną w wielkich kaloryach, otrzymamy, mnożąc masę wody w kilogramach przez przyrost temperatury w stopniach C.; daje to $6{,}31 \times 0{,}21 = 1{,}9261$ kaloryi. A zatem, na wytworzenie 1,9461 kal. ciepła zużyta została praca mechaniczna, równa 842,24 kilogramometrów, czyli na każdą kalorye przypada $842{,}24 : 1{,}9461 = 431$ kilogramometrów.

Przeprowadziliśmy tu rachunek w formie uproszczonej, nie zwracając uwagi na przyczyny strat ubocznych, które ponosi zużyta energia mechaniczna; takiemi przyczynami, oprócz wspomnianej już resztki prędkości u gwichtów w chwili dosięgania ziemi, są tarcia sznurków, bloków itp. Joule, wprowadziwszy do rachunku wszelkie możliwe poprawki, otrzymał z

wielu bardzo doświadczeń liczbę przeciętną 425 kilogramometrów, jako odpowiednik dla wielkiej koloryi. Podług nowszych badań liczba ta zbliżałaby się raczej do 427.

Oczywiście, wyniku doświadczeń Joule'a nie należy rozumieć w taki tylko sposób, że oto w pewnem szczególnem doświadczeniu, w miejscu 425 kgm. zużytej pracy mechanicznej, powstała kalorya ciepła. Przeciwnie, wynik ten ma znaczenie całkiem ogólne i daje się wyrazić w zdaniu następującem: gdziekolwiek, kiedykolwiek i jakkolwiek praca mechaniczna zamienia się na ciepło, zawsze zamiana ta odbywa się w tym stosunku, że w miejscu każdych 427 kilogramometrów pracy powstaje jedna kalorya (wielka) i odwrotnie z każdej kaloryi ciepła wytwarza się 427 kgm. pracy mechanicznej, rozumie się, pod warunkiem, że żadna część pracy, ani ciepła nie zostanie zmarnowana, tj. zużyta na inne skutki (np. na elektryzowanie, magnesowanie itp.).

Liczba, przez którą trzeba pomnożyć liczbę jednostek zużytego lub otrzymanego ciepła, aby otrzymać liczbę jednostek otrzymanej lub zużytej pracy, nazywa się mechanicznym równoważnikiem ciepła. W układzie kilogramometr — wielka kalorya — wartość liczebna tego równoważnika wynosi jak widzieliśmy, 427; w układzie erg — mała kalorya wartość jego wyniesie $427 \times 1000 \times 981 \times 100 + 0{,}001$, czyli w liczbie okrągłej 41900000 (1 § 26).

O ROZCHODZENIU SIĘ ŚWIATŁA

I.

§ 1. **Światło rozchodzi się prostoliniowo.** Z punktu świecącego światło rozchodzi się na wszystkie strony, wzdłuż linij, których kierunki wyznaczają kierunki tak zwanych promieni świetlnych. Jeżeli pomiędzy okiem a takim punktem świecącym, którym może być np. tlejący koniec zapałki, umieścimy ekran z dziurką, to punkt nasz zobaczymy tylko w takim razie, jeżeli oko nasze, sam punkt i dziurka ekranu znajdą się na jednej i tej samej linij prostej. Światło zatem rozchodzi się w tym wypadku wzdłuż linii prostej, i dzieje się to zawsze, jeżeli tylko środek, w którym leży cała droga promienia świetlnego, jest jednorodny.

§ 2. **Cień i pół - cień.** W związku z prostoliniowem rozchodzeniem się światła znajduje się rzucanie cienia przez ciała nieprzezroczyste, umieszczone na drodze promieni świetlnych. Jeżeli światło pochodzi od jednego punktu

świecącego S (fig. 1), to wówczas otrzymujemy cień zupełny GH, ani jeden bowiem promień

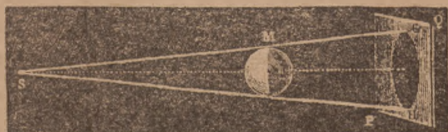


Fig. 1

światła nie pada na ekran PQ w obrębie stożka, utworzonego przez promienie świetlne, okalające oświetloną kulę M. Jeżeli, przeciwnie, źródłem światła jest ciało większych rozmiarów, np. kula SL (fig. 2), to wtedy, oprócz pełnego cienia GH, zawartego pomiędzy liniami SG i LH, będziemy mieli pierścień tak zwanego półcienia, okolonego nazewnątrz liniami LD i SC i przechodzącego stopniowo w oświetloną część ekranu.

§ 3. **Obrazy, wytwarzane przez małe otwo-**

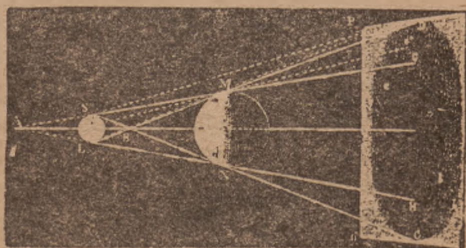


Fig. 2

ry. Wiązka światła, wpadająca przez niewielki otwór, zrobiony np. w okiennicy zaciemnio-

nego pokoju, daje na przeciwległej ścianie plamkę świetlną, której kształt zależy od kształtu otworu. Każdy punkt przedmiotu oświetlonego, umieszczonego nazewnątrz pokoju, rzuca przez otwór taką wiązkę światła. Tak np. wiązka wychodząca z wierzchołka drzewa A, (fig. 3) daje plamkę świetlną w miejscu a, krzyżując się przytem w samym otworze z inną wiązką, która, wyszedłszy z podstawy drzewa B, daje



Fig. 3

plamkę b. Nieprzerwany układ takich plamek świetlnych, z których każda pochodzi od innego punktu świecącego przedmiotu (każdy przedmiot oświetlony odbija część padającego nań światła, jest więc zarazem przedmiotem świecącym) wytwarza na ścianie o b r a z danego przedmiotu. Wskutek krzyżowania się wiązek przy przechodzeniu przez otwór, obraz ten jest odwrócony.

§ 4. **Prędkość światła.** Światło rozchodzi się z tak olbrzymią prędkością, że w warun-

kach zwyczajnych nie sposób jest zauważyć czasu, upływającego pomiędzy chwilą, gdy dane źródło światło zaczyna świecić, a chwilą, w której oko nasze spostrzega światło. Ponieważ największe odległości ziemskie światło przebywa "w mgnieniu oka," przeto przez długie wieki mniemano, że nie potrzebuje ono wcale czasu na przebycie bodaj najdłuższej drogi.

Pierwszym, który dowiódł, że tak nie jest, był Duńczyk Roemer (1675). Astronom ten, obserwując szereg zaćmień jednego z księżyców Jowisza, zauważył, że, gdy Ziemia znajduje się pomiędzy Jowiszem a Słońcem, to zaćmienia te następują wcześniej, aniżeli można tego oczekiwać na zasadzie pewnych teoretycznych obliczeń; gdy zaś Ziemia znajduje się po przeciwnej stronie swej orbity, natenczas zaćmienia spóźniają się. W tym drugim wypadku Ziemia oddalona jest od księżyca Jowiszowego o całą średnicę swej orbity więcej, aniżeli w pierwszym wypadku.

Otóż, rozpatrzywszy się w wynikach swych spostrzeżeń, Roemer doszedł do wniosku, że zaćmienia r z e c z y w i s t e odbywają się dokładnie w czasach, przewidzianych przez teoryę, przyśpieszenie zaś, względnie opóźnienie zjawiska w i d z i a l n e g o pochodzi stąd, że w drugim wypadku światło przebiec musi drogę dłuższą, aniżeli w pierwszym wypadku, wskutek czego powstaje właśnie owa różnica w czasie.

Podług najnowszych obliczeń, średnica drogi ziemskiej równa się 296,000,000 km., zaś opóźnienie — 1000 sek., skąd wypada na prędkość światła liczba 296,000,000:1000=296.000 km. na sekundę. Oczywiście, jest to prędkość światła w próżni, albowiem część jego drogi, leżąca w atmosferze ziemskiej, jest znikomo mała w stosunku do całości.

W r. 1849 Fizeu oznaczył prędkość światła w powietrzu ziemi. Zasada użytej przezeń metody była następująca. Promień światła, wychodzący ze stacyi A, padał prostopadle na zwierciadło, umieszczone na stacyi B, oddalonej o kilka kilometrów, i, odbiwszy się, wracał na stacyę A, gdzie napotykał na drodze do oka obserwatora, punkt obwodu koła zębatego, ustawionego poprzecznie do kierunku promienia. Dopóki koło to znajduje się w spoczynku, promień odbity powraca przez ten sam przedział między zębami, przez który był wyszedł ze stacyi A; skoro jednak zaczniemy obracać koło, zwiększając stopniowo jego prędkość, to wreszcie dojdziemy do takiej prędkości, że promień światła, który wyszedł był przez przedział między zębami, znajdzie, gdy wróci drogę zamkniętą przez ząb koła, następujący za tym przedziałem, wskutek czego obserwator nie zobaczy światła wcale. Znając liczbę zębów koła oraz liczbę obrotów na sekundę, obliczyć możemy czas, który zużyło koło na taką część obrotu, czyli czas,

zużyty przez promień na przejście podwójnej odległości pomiędzy stacyami, a zatem prędkość światła.

Fizeau znalazł na tej drodze liczbę 260,000 km. na sekundę. W nowszych czasach, Cornu, zastosowawszy do metody Fizeau'a szereg udoskonaleń, otrzymał liczbę 300,000 km. na sekundę. W wodzie prędkość światła okazała się nieco mniejszą, aniżeli w próżni.

§ 5. **Aberracya światła.** Kula, wystrzelona prostopadle do bocznej ściany pędzącego wagonu kolejowego, przebija jego wnętrze tem bardziej ukośnie, im większa jest prędkość pociągu w stosunku do prędkości kuli. Ponieważ luneta astronomiczna, wycelowana w gwiazdę, biegnie wraz z Ziemią dokoła Słońca, przeto światło, "wystrzelone" w pewnej danej chwili z gwiazdy równolegle do osi lunety i biegnące stale w kierunku niezmiennym, przeszywa wnętrze lunety w kierunku ukośnym względem jej osi, tak iż, chcąc żeby promień przebiegał ściśle wzdłuż osi, trzeba lunetę pochylić o pewien kąt naprzód w kierunku biegu Ziemi; innemi słowy, promień światła, który w danej chwili znaczy ślad widzialny, równoległy do osi lunety, w rzeczywistości posiada kierunek nieco nachylony względem tej osi. To nachylanie się promienia nosi miano aberracyi światła; jest ono bardzo nieznaczne, albowiem prędkość Ziemi jest bardzo niewielka w porównaniu z

prędkością światła. Znając wielkość kąta nachylenia oraz prędkość Ziemi, można wyprowadzić stąd prędkość światła. Otrzymano tą drogą liczbę 297,000 km. na sekundę.



II.

O odbijaniu się światła.

§ 6. **Prawo odbijania się światła.** Napotkawszy na swej drodze gładką powierzchnię, np. zwykłe zwierciadło, płytkę metalową polerowaną itp., promień światła odbija się od niej prawidłowo, tj. zostaje przez nią odrzucony w pewnym określonym kierunku, który zależy od oryentacyi danej powierzchni względem promienia padającego.

Niech Az (fig. 4) będzie kierunkiem promienia, padającego na zwierciadło z. Jeżeli w punkcie z wystawimy linię zh, prostopadłą do zwierciadła i wyobrazimy sobie płaszczyznę, zawierającą w sobie zarówno linię Az jak i li-

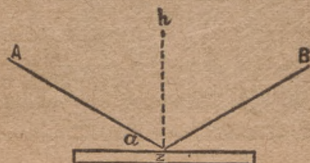


Fig. 4

nię zh, to w tej samej płaszczyznie, którą nazywać będziemy płaszczyzną padania, szukać należy i promienia odbitego zB, przyczem nachy-

lenie tego promienia względem linii zh będzie takie same, jak i nachylenie promienia Zz; innemi słowy, kąt odbicia Bzh równać się będzie kątowi padania Zzh. Zależność więc pomiędzy kierunkiem promienia padającego a kierunkiem promienia odbitego daje się wyrazić krótko w zdaniu: promień odbity, pozostając w płaszczyźnie padania, przebiega w niej w takim kierunku, że kąt odbicia równa się kątowi padania. Widzieliśmy (11 § 21), podług tego samego prawa odbija się od płyty kula sprężysta.

§ 7. **Rozpraszanie się światła.** Powierzchnię nierówną, chropowatą można sobie wyobrazić, jako złożoną z wielkiej liczby mikroskopijnych płaszczyzn, rozmaicie względem siebie ponachylanych. Na fig. 5 przedstawione jest silnie powiększone przecięcie takiej powierzchni, na którą pada wiązka światła, złożona z pro-



Fig. 5

mieni równoległych. Każdy z tych promieni, padając na inną płaszczyznę, zostaje odbity w innym kierunku, wskutek czego, zamiast odbi-

tej wiązki, jak w wypadku zwierciadła, otrzymujemy gromadę promieni, skierowanych najrozmaiciej i stanowiących tak zwane światło rozproszone. Rozpraszanie się światła jest przyczyną tego, że widzimy nie tylko przedmioty świecące, lecz także i przedmioty oświetlone. Istotnie, odbijając się prawidłowo, np. od zwierciadła, światło świecy, lampy lub Słońca daje obraz źródła, z którego pochodzi, nie zaś przedmiotu na który pada; jedynie śwatło rozproszone czyni widzialną całą powierzchnię ciała oświetlonego.

§ 8. **O tworzeniu się obrazów w zwierciadłach.** Wyobraźmy sobie punkt świecący A (fig. 6), umieszczony przed zwierciadłem NM. Punkt ten wysyła na wszystkie strony prostoliniowe promienie, których część, napotkawszy na drodze swej powierzchnię zwierciadła, odbija się od niej podług prawa, sformułowanego w § 5. — Na załączonym rysunku przedstawione są dwa takie promienie, które wyszły z punktu A i, odbiwszy się od zwierciadła w punktach B i C, wpadają do oka o obserwatora, patrzącego w zwierciadło. Promień AB, który ze swoim pionem tworzy kąt padania mniejszy, aniżeli promień AC ze swoim, tworzy również i kąt odbicia mniejszy, wskutek czego odbite czę-

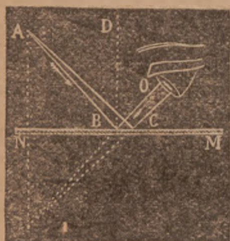


Fig. 6

ści tych promieni odchylają się od siebie w miarę posuwania się od powierzchni zwierciadła ku oku obserwatora. Jeżeli w wyobraźni naszej kierunki tych odbitych promieni przedłużymy wstecz, poza powierzchnię zwierciadła, to okaże się, że przetną się one wzajemnie w punkcie a, położonym poza zwierciadłem, dokładnie naprzeciwko punktu A i w takiej odległości od powierzchni NM, w jakiej sam punkt A znajduje się przed zwierciadłem.

Ponieważ przy widzeniu wnioskujemy o położeniu źródła światła jedynie z kierunku promieni, wpadających bezpośrednio do oka, i to się wcale o rzeczywiste miejsce pochodzenia tych promieni, ani o drogę, którą mogły one odbyć przedtem, przeto w powyższym przykładzie, w punkcie przestrzeni a za zwierciadłem, oko obserwatora, znajdującego się przed zwierciadłem, zobaczy punkt świecący, który nazywa się obrazem domniemanym punktu A. Nazwa domniemany oznacza, że obraz ten nie jest utworzony, jak obraz rzeczywisty, przez skrzyżowanie dwóch rzeczywistych, fizycznych promieni świetlnych, lecz przez zejście się dwóch geometrycznych, pomyślanych tylko przedłużeń promieni odbitych.

Widzieliśmy, że punkt A (fig. 7) przedmiotu AB, umieszczonego przed zwierciadłem, daje obraz domniemany poza zwierciadłem w punkcie przestrzeni a; zupełnie tak samo punkt B tego przedmiotu daje obraz domniemany w punkcie b, który leży na przecięciu odpowiednich kierunków promieni. Łatwo się przekonać,

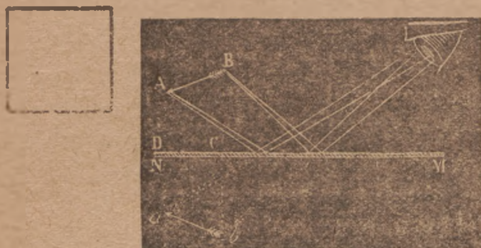


Fig. 7

że obrazy domniemane punktów strzałki AB, położonych pomiędzy A i B, uszeregują się wzdłuż prostej ab. Tym sposobem strzałka ab, położona za zwierciadłem, będzie obrazem domniemanym strzałki AB, znajdującej się przed zwierciadłem. Można dowieść, że obraz ten posiada wielkość samego przedmiotu i znajduje się w tej samej odległości za zwierciadłem, co przedmiot przed zwierciadłem.

Jeżeli zamiast strzałki AB umieścimy przed zwierciadłem postać ludzką, której prawe ramię będzie w A a lewe w B, to sobowtór tego człowieka w zwierciadle. czyli obraz domniemany, będzie miał, jak łatwo zauważyć, lewe ramię w a, zaś prawe w b. Człowiek, mający w

rzeczywistości obrączkę na lewej ręce, będzie ją posiadał w zwierciadle na prawej itp., jednem słowem, obraz domniemany jest, jak mówimy, symetryczny względem przedmiotu rzeczywistego.

Badanie obrazów, tworzących się w zwierciadłach niepłaskich, z których najważniejsze są sferyczne czyli kuliste, oraz paraboliczne, można sprowadzić teoretycznie do badania obrazów, powstającycśh w zwierciadłach płaskich.

W tym celu rozpatrujemy dane zwierciadło jako zbiór niezmiernie wielkiej liczby niezmiernie drobnych płaszczyzn, albo, wyrażając się obrazowo, jako powierzchnię, jak gdyby wytapetowaną malutkiemi zwierciadełkami płaskiemi, i, roztrząsnąwszy kierunki, w których biegną promienie padające, określamy na podstawie prawa z § 5 kierunki promieni odbitych; następnie szukamy miejsc, gdzie przecinają się bądź same promienie odbite, bądź ich przedłużenia geometryczne, i wreszcie, odszukawszy te miejsca, wyprowadzamy stąd cechy otrzymanych obrazów, które mogą być rzeczywiste lub domniemane, zwiększone lub zmniejszone, proste lub odwrócone,a to w zależności zarówno od kształtu samego zwierciadła, jak i od położenia przedmiotu względem tegoz wierciadła.

Tytułem przykładu rozważymy tu w krótkości tworzenie się obrazów w zwierciadle kulistem wklęsłem.

Na fig. 8 łuk MN przedstawia przekrój takiego zwierciadła, przeprowadzony przez wierzchołek zwierciadła A, oraz przez środek krzywizny C, tj. przez środek tej fikcyjnej powierzchni kulistej, której częścią jest powierzchnia naszego zwierciadła. Linia ZA, przechodząca przez punkty A i C, nazywa się osią zwierciadła. Niech na zwierciadło pada wiązka promieni, równoległych do osi: HB, GD, LA.



Fig. 8.

Posługując się wyżej przytoczonem rozumiewaniem, tj. rozpatrując dane zwierciadło jako zbiorowisko malutkich zwierciadełek płaskich, można dowieść, że, jeżeli tylko stopień wklęsłości zwierdciadła nie jest zbyt wielki, to wszystkie promienie padającej wiązki, po odbiciu się w punktach zwierciadła B, D, A..., zejdą się mniejwięcej w jednym i tym samym punkcie przestrzeni F, położonym na osi zwierciadła na połowie drogi pomiędzy wierzchołkiem zwierciadła A a środkiem jego krzywizny C. Punkt F nazywa się ogniskiem zwierciadła (głównym), a odległość FA, równa połowie promienia kuli, odległością ogniskową główną.

Rozpatrując przy pomocy geometryi kierunki, w których muszą się odbić od zwierciadła wklęsłego promienie, wychodzące z jakiegokolwiek jednego punktu, umieszczonego przed zwierciadłem, przekonywamy się, że wszystkie te promienie albo same zbiegają się po odbiciu w jednym jakimś punkcie przestrzeni, albo też, że zbiegają się w jednym jakimś punkcie przestrzeni ich przedłużenia geometryczne. W pierwszym wypadku otrzymujemy obraz rzeczywisty punktu, z którego wyszły promienie, w drugim wypadku — obraz domniemany tego punktu. Tym sposobem każdemu punktowi przedmiotu, umieszczonego przed zwierciadłem, odpowiada obraz jego rzeczywisty lub domniemany, a zbiorowisko wszystkich tych obrazów daje nam obraz samego przedmiotu.

O b r a z y r z e c z y w i s t e daje nam zwierciadło sferyczne wklęsłe wtedy, gdy przedmiot umieszczony jest dalej od wierzchołka A zwierciadła, aniżeli ognisko F; w przeciwnym razie otrzymujemy obrazy domniemane. Te ostatnie są zawsze proste i powiększone. Obrazy rzeczywiste są zawsze odwrócone i mogą być zmniejszone lub zależnie od tego, czy przedmiot jest umieszczony dalej od wierzchołka A,aniżeli środek krzywizny C, czy też bliżej. Obraz rzeczywisty można uwidocznić dla całego otoczenia, chwytając go na ekran, np. na ćwiartkę białego papieru.

III.

O załamywaniu się światła.

§ 9. **Załamywanie się światła.** Promień światła, przechodząc z jednego ośrodka do drugiego, np. z powietrza do wody, ukośnie do powierzchni, rozdzielającej te dwa ośrodki, doznaje nagłej zmiany kierunku, czyli *załamuje się*, tak iż część promienia, przebiegająca w wodzie, nie stanowi przedłużenia części, przebiegającej w powietrzu, lecz tworzy z nią kąt mniejszy lub większy stosownie do okoliczności.

Pomiędzy dwiema częściami tak złamanego promienia zachodzi zależność, która pozwala nam znaleźć kierunek jednej z tych części, jeżeli znane nam są: kierunek drugiej, oraz pewna liczba, charakterystyczna dla danej pary ośrodków (np. dla powietrza i wody), a zwana *współczynnikiem załamania*.

Jeżeli przeprowadzić płaszczyznę przez jedną część złamanego promienia, oraz przez pion, wystawiony w punkcie złamania do powierzchni, rozdzielającej ośrodki, to w tej samej płasz-

czyźnie znajdzie się idruga część złamanego promienia.Część O I I (fig 9) promienia, przebiegająca w wodzie, zawiera się w płaszczyźnie, przeprowadzonej przez część S O promienia, przebiegającą w powietrzu,oraz przez pion A B, wystawiony w punkcie złamania o do powierzchni n m, rozdzielającej powietrze od wody.

Część złamanego promienia, przebiegająca w ośrodku optycznie gęstszym (ośrodek mniej gęsty w znaczeniu zwyczajnem może być gęstszym optycznie; tak np. alkohol jest optycznie gęstszy od wody, chociaż gęstość jego wynosi tylko 0,79), jest zawsze mocniej nachylona ku wspomnianemu pionowi, aniżeli część promienia, przebiegająca w ośrodku mniej gęstym: część O H, przebiegająca w wo-

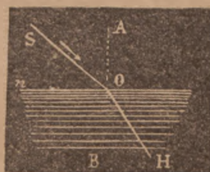


Fig. 9.

dzie (fig. 9), jest mocniej nachylona ku pionowi A B, aniżeli część S O, przebigająca w powietrzu.

Jeżeli znamy przebieg jakiegoś jednego promienia w obu ośrodkach, to możemy znaleźć dla tej pary ośrodków ową liczbę, zwaną współczynnikiem załamania (światła), przy któ-

rej pomocy do każdego promienia padającego można dobudować odpowiedni załamany. Tak np. znalazłszy z doświadczenia, że promień S o (fir. 9) przechodząc z powietrza do wody,przybiera kierunek O H, możemy obliczyć współczynnik załamywania się światła dla powietrza i wody, a skoro raz otrzymamy tę liczbę, natenczas potrafiamy dla każdego promienia, przechodzącego przez powietrze, dobudować jego dalszy ciąg w wodzie.

§ 10. **O pryzmacie.** Pryzmatem nazywamy w optyce klinowatą bryłę jakiegokolwiek ciała, załamującego światło, a więc szkła, soli, kwarcu etc. Na fig. 10 trójkąt ABC przedstawia przecięcie pryzmatu, zrobione prostopadle do jego krawędzi.

§ 11. **O soczewkach.** Soczewkami nazywamy bryły substancyi, załamującej światło, ograni-

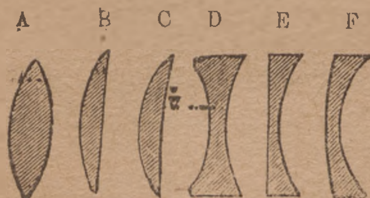


Fig. 11

czone powierzchniami sferycznemi. Na fig. 11 widzimy (w przecięciu) ważniejsze kształty soczewek. Kształty te można odnieść do dwuch głównych typów. Jeden z nich, do którego należą 3 pierwsze soczewki, przypomina do pew-

nego stopnia dwa pryzmaty, zestawione podstawami, drugi (pozostałe 3 soczewki) podobniejszy jest raczej do dwóch przyzmatów, zestawionych krawędziami. Na zasadzie tej analogii, możemy, znając przebieg załamywania się promieni w pryzmacie, wytworzyć sobie przybliżone pojęcie o sposobie, w jaki załamywać się będą promienie, puszczone na taką lub inną soczewkę; w jednym bowiem i drugim wypadku odchylenie promienia następuje ku podstawie pryzmatu. W skutek tego promienie światła, przechodząc przez soczewkę pierwszego typu, zbliżają się do jej osi i na ogół ujawniają, dążność do skupiania się poza soczewką, gdy tymczasem przy przejściu przez soczewkę drugiego typu promienie oddalają się od osi i dążą do rozpraszania się we wszystkie strony. Dlatego to soczewki pierwszego rodzaju nazywają się skupiającemi, soczewki zaś drugiego rodzaju noszą miano rozpraszających.

§ 12. **Soczewka dwuwypukła.** Przypatrzmy się nieco bliżej załamywaniu się światła w soczewce dwuwypukłej. Wiązka promieni, rzucona przez jeden z punktów świecy B (fig. 12-linie pełne), pada na soczewkę C i, załamawszy się w niej ku wspólnej podstawie pryzmatów, a więc ku osi soczewki, wpada do oka D obserwatora, który widzi obraz danego punktu świecy w punkcie A, gdzie się zbiegają przedłużenia wsteczne załamanych promieni (oznaczo-

ne liniami kropkowanemi). Obraz ten, jako wytworzony przez skrzyżowanie przedłużeń promieni, nie zaś samych promieni rzeczywistych, jest obrazem domniemanym. Obraz przedmiotu domniemany otrzymujemy zawsze, ilekroć przedmiot sam znajduje się bliżej soczewki skupiającej, aniżeli jej ognisko (ogniskiem soczewki nazywamy punkt przestrzeni, w którym zbiegają się, po przejściu przez soczewkę, promienie, padające na nią równolegle do jej osi;

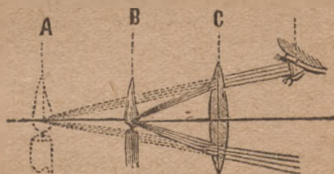


Fig. 12

oczywiście ognisk takich jest dwa — po jednym z każdej strony soczewki; porównaj § 8);jest on zawsze prosty i powiększony. Taki wypadek przedstawia właśnie fig. 12, gdzie uzmysłowiony jest przebieg dwuch wiązek świetlnych symetrycznych (górnej i dolnej), wychodzących z jednego punktu świecy.

Jak widzimy, wiązki te, będące rozbieżnemi przy wyjściu ze świecy (na fig 12 linie pełne), pozostają rozbieżnemi i po przejściu przez soczewkę, chociaż, wskutek załamania, rozbieżność ta zostaje znacznie zmniejszona. Jeżeli teraz tę samą świecę umieścimy na odległości,większej od odległości ogniskowej soczewki,to pro-

mienie, wychodzące ze świecy, jako wiązka rozbieżna, załamując się w soczewce, nachylą się tak dalece ku jej osi, że wyjdą z soczewki już jako wiązka zbieżna i dadzą w miejscu swego przecięcia obraz świecy. Obraz ten będzie rzeczywisty, jako utworzony przez skrzyżowanie rzeczywistych promieni fizycznych. Analiza gieometryczna, w którą wdawać się tu nie możemy, wykazuje, że obraz ten będzie zawsze odwrócony i może być zmiejszony albo powiększony, zależnie od tego, czy świece umieścimy dalej niż na podwójnej odległości ogniskowej soczewki, czy też bliżej. Na fig. 13 przedstawiony jest ten drugi wypadek: promienie, wychodzące ze świecy A, umieszczonej na odległości mniejszej od podwójnej odległości ogniskowej (lecz dalej, rozumie się od soczewki B, aniżeli jej ognisko) dają po przejściu przez soczewkę obraz świecy rzeczywisty, odwrócony i powiększony, który można schwycić podstawiwszy w odpowiedniem miejscu przestrzeni ćwiarkę papieru C.

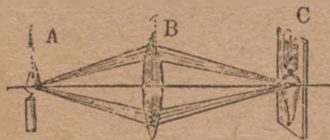


Fig. 13

Na rysunku uwidoczniony jest przebieg dwóch tylko wiązek promieni, odpowiadającychjednemu tylko punktowi świecy.

§ 13. **Mikroskop prosty.** Widzieliśmy, (§ 12

fig. 12), że, patrząc na przedmiot przez soczewkę dwuwypukłą, umieszczoną w niewielkiej od niego odległości, oko nasze zamiast rzeczywistego przedmiotu spostrzega domniemany jego obraz, prosty i powiększony. Soczewka taka nosi miano lupy lub prostego mikroskopu; tę ostatnią nazwę nadajemy jej przeważnie w takim razie, jeżeli jest zaopatrzona w niektóre dodatkowe urządzenia, ułatwiające obserwowanie, jak naprzykład stoliczek do umieszczeina przedmiotów oglądanych, zwierciadełko dla lepszego ich oświetlania itp.

§ 14. **Mikroskop złożony** posiada w najprostszej swej postaci dwie soczewki dwuwypukłe, umieszczone jedna za drugą w jednej i tej samej rurze. Jedna z tych soczewek, mianowicie ta, pod którą umieszczamy przedmiot obserwowany, nazywa się objektywem (szkłem przedmiotowem), druga, do której przykładamy oko, nosi miano okularu (szkła ocznego). Przedmiot obserwowany, umieszczony od objektywu na odległości nieco większej,aniżeli odległość ogniskowa tej soczewki, daje po drugiej stronie objektywu obraz rzeczywisty odwrócony i powiększony (§ 12 fig. 13).Ten obraz, już powiększony, powiększamy sobie jeszcze, oglądając go z kolei przez okular, jak przez lupę. Okular umieszczamy tak, by obraz znalazł się między nim a jego ogniskiem;tym sposobem,patrząc na dany przedmiot przez okular złożonego mikro-

skopu, widzimy obraz tego przedmiotu — coś jak gdyby kopię rzeczywistości: mianowicie widzimy obraz domniemany powiększony i prosty obrazu rzeczywistego powiększonego i odwróconego. Ostatecznie więc mikroskop taki daje obraz przedmiotu domniemany, odwrócony i dwukrotnie powiększony; jeżeli objektyw powiększa 10 razy a okular 4 razy, to w rezultacie zobaczymy obraz 10×4=40 razy większy od przedmiotu, t. j. otrzymamy powiększenie 40 krotne.

§ 14 **Luneta astronomiczna.** Widzieliśmy, że w mikroskopie przedmiot powinien być umieszczony od objektywu na odległości nieco tylko większej, aniżeli odległość ogniskowa. Rzecz oczywista, że przyrząd taki nie nadaje się zupełnie do odserwowania przedmiotów oddalonych, naprzykład ciał niebieskich, których nie możemy przecież umieścić w odległości kilku centymetrów przed soczewką.

W najprostszej swej postaci luneta astronomiczna składa się, podobnie jak i mikroskop, z dwóch wypukłych soczewek: objektywu, zwróconego ku ciału obserwowanemu.. i okularu, przez który patrzy obserwator; ale ponieważ. wskutek ogromnej odległości przedmiotu od objektywu, promienie od tego przedmiotu biegną prawie równolegle, przeto po przejściu przez tę soczewkę daja one obraz przedmiotu tuż za jej ogniskiem. Obraz ten jest rzeczywisty,odwróco-

ny i niesłychanie zmniejszony. Oglądając go przez okular, jak przez lupę, otrzymujemy obraz obrazu, mianowicie obraz domniemany prosty i nieco powiększony obrazu rzeczywistego, odwróconego, a zatem w ostatecznym wyniku oko widzi obraz ciała niebieskiego domniemany odwrócony i zmniejszony.

Widzimy więc, że luneta astronomiczna nie powiększa właściwie ciała niebieskego, lecz przeciwnie daje jego obraz zmniejszony. Najpotężniejszy z tych przyrządów nie ukaże nam nigdy Słońca lub Księżyca w rozmiarach większych od tych, jakie ciała te posiadają w rzeczywistości. Gdy więc mówimy, że dana luneta astronomiczna powiększa tyle a tyle razy, mamy na myśli zjawisko całkiem innego rodzaju.

Wiadomo, że pozorną długość linii, stojącej prostopadle do kierunku widzenia, oko nasze ocenia według wielkości tak zwanego kąta widzenia, t. j. kąta, który tworzą pomiędzy sobą kierunki dwóch promieni, wychodzących z końców danej linii i przecinających się we wnętrzu oka w punkcie, zwanym punktem krzyżowania. Kąt ten jest oczywiście tem mniejszy, im przedmiot obserwowany jest dalej. Olbrzymia w rzeczywistości tarcza słoneczna wydaje nam się mniejsza od koła u wozu, przejeżdżającego w odległości kilkunastu kroków, a planety przedstawiają się oku nieuzbrojonemu, jako punkciki, nie posiadające wymiarów. W lune-

cie astronomicznej obraz ciała niebieskego, utworzony przez objektyw, jest wprawdzie niesłychanie zmniejszony w porównaniu z rzeczywistą wielkością przedmiotu, niemniej przeto kąt widzenia, zamykany przez ten obraz, jest znacznie większy od kąta, zamykanego przez sam przedmiot, wskutek czego obraz planety, nawet bez powiększenia przez okular, wydałby się nam większym od planety rzeczywistej widzianej gołem okiem; tym większym wydą nam się ten obraz, widziany przez lupę.

Wogóle, działanie lunety astronomicznej można scharakteryzować w sposób następujący: w przyrządzie tym objektyw, tworząc obraz, którego średnica zamyka kąt widzenia, większy od kąta, zamykanego przez sam obserwowany przedmiot, niejako przybliża do nas ten przedmiot, zaś okular, działając jak zwykła lupa, ten "przedmiot przybliżony" powiększa- Dlatego też nie jest pozbawione słuszności rozróżnienie, które czynimy w języku potocznym, pomiędzy działaniem mikroskopu a działaniem lunety astronomicznej, mówiąc, że pierwszy powiększa przedmiot obserwowany a druga go przybliża.

Gdy powiadamy, że dana luneta astronomiczna powiększa 1000 razy, to znaczy, że kąt, pod którym widzimy w niej obraz ciała niebieskiego jest 1000 razy większy, aniżel kąt, pod którym

spostrzegamy ciało rzeczywiste okiem nieuzbrojonem. Można dowieść, że powiększenie lunety, tj. stosunek pomiędzy temi dwoma kątami widzenia równa się stosunkowi pomiędzy odległością ogniskową objektywu a odległością ogniskową okularu. Potężna luneta powinna więc posiadać objektyw o odległości ogniskowej bardzo znacznej, natomiast okular o odległości ogniskowej niewielkiej.

Prócz opisanej lunety astronomicznej, zwanej take teleskopem refrakcyjnym albo refraktorem, istnieje wiele innych przyrządów, służących do obserwacyi przedmiotów oddalonych, jak: luneta ziemska, dająca obrazy proste, lornetka teatralna, oraz cały szereg teleskopów refleksyjnych albo reflektorów, w których zamiast soczewek występują zwierciadła sferyczne, dające obrazy nie przez załamanie (refrakcyę) światła, lecz przez odbicie (refleksyę).

Z powodu braku miejsca ograniczymy się tu jedynie wzmianką o istnieniu tych przyrządów. Z tego samego powodu zmuszeni jesteśmy pominąć zupełnie opis przyrządów tak zwanych projekcyjnych, takich, jak np. latarnia czarnoksięzka, służących do rzucania na ekran obrazów powiększonych lub zmniejszonych, a opartych również na działaniu soczewek lub zwierciadeł.

IV.

ROZSZCZEPIANIE SIĘ ŚWIATŁA. ANALIZA SPEKTRALNA.

§ 16. **Doświadczenie Newtona.** Niech przez otwór, zrobiony w okiennicy zaciemnionego pokoju, wpada do niego wiązka światła słonecznego SA (fig. 14). W przypuszczeniu, że pryzmat szklany P, który widzimy na rysunku, tym-

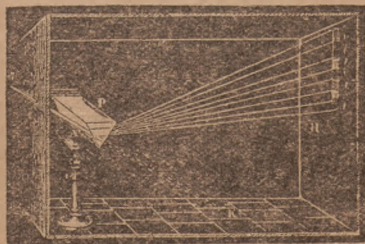


Fig. 14

czasem nie istnieje, otrzymamy na podłodze pokoju jasną plamę bezbarwną K. Zasłońmy otwór w okiennicy szybką ze szkła czerwonego i umieśćmy na drodze wiązki świetlnej pryzmat

P, zwrócony kątem na dół, jak wskazuje fig.14. Cóż nastąpi? Wiązka światła czerwonego załamawszy się na wzór promienia z fig. 10, raz przy przejściu z powietrza do szkła, drugi raz przy przejściu ze szkła do powietrza, odchyli się w rezultacie ku podstawie pryzmatu, tj. na naszym rysunku do góry, i, padając na ścianę H, utworzy na niej w miejscu r plamę czerwoną.

Jeżeli zamiast szkła czerwonego użyjemy do zasłonięcie otworu szybki fioletowej, to okaże, się, że wiązka promieni tej barwy, rzucona na pryzmat w tym samym kierunku SA, co i wiązka czerwona, załamie się mocniej zarówno przy przejściu z powietrza do szkła, jak i przechodząc ze szkła do powietrza, a wynikiem tego mocniejszego załamania się będzie znaczniejsze odchylenie się wiązki świetlnej ku podstawie pryzmatu i utworzenie plamy fioletowej w miejscu ściany v, położonem wyżej, aniżeli miejsce r. na które poprzednio padała plama czerwona.

Przy użyciu szkła żółtego otrzymamy na ścianie plamę żółtą, położoną wyżej od miejsca, gdzie leżała plama czerwona, lecz niżej od miejsca, na które przypadała plama fioletowa, a to z powodu,że promienie żółte załamują się w pryzmacie mocniej od czerwonych, lecz słabiej od fioletowych.

W całkiem podobny sposób można się przekonać, że plama pomarańczowa utworzy się w miejscu ściany o, plama zielona w miejscu v,

plama niebieska w miejscu b, plama indygo w miejscu i, skąd wynika, że najsłabiej załamują się promienie czerwone, najmocniej fioletowe, łamliwość zaś pozostałych promieni postępuje w porządku wskazanym przez szereg liter na figurze, j, v, b, i,

Jeżeli teraz, nie używając wcale szkła kolorowego,puścimy w tym samym kierunku.SA,wiązkę promieni słonecznych naturalnych, to na ścia nie otrzymamy jednocześnie wszystkie te barwne plamy, które przedtem otrzymywaliśmy zosobna. W tem nowem doświadczeniu każda z plam zajmie na ścianie ściśle to samo miejsce, które zajmowała, gdy była rzucona pojedyńczo, tak iż wszystkie, razem wzięte, uszykują się jedna obok drugiej w szeregu pionowym i utworzą to, co nazywamy widmem słonecznym, mianowicie barwą wstęgę, w której rozróżnić można z łatwością wszystkie 7 zasadniczych kolorów tęczy, pomimo że każda barwa przechodzi w barwę sąsiednią nie raptownie, lecz nieznacznie poprzez wszystkie odcienie pośrednie.

Powiadamy w tym wypadku, że światło białe, przechodząc przez pryzmat, rozdziela się na swe części składowe:wiązka biała rozszczepia się na wiązki barwne. Przyczyna tego rozszczepienia jest, jak widzieliśmy, rozmaita łamliwość promieni.składających się na światło białe.Biegnąc prostoliniowo, wiązka światła naturalnego nie zdradza niczem tego, że jest właściwie zbio-

rowiskiem wielu promieni barwnych; dopiero z chwilą napotkania pryzmatu gdy następuje zmiana kierunku, zarysowuje się, jeżeli tak się wyrazić można, indywidualność tych promieni składowych, z których każdy załamuje się po swojemu i odtąd już odbywa drogę samodzielnie.
Jeżeli takie rozszczepienione promienie potrafimy zmusić do tego, aby znowu zeszły się razem, to otrzymamy napowrót światło białe. Takiej syntezy światła można dokonać, stawiając naprzykład na drodze rozczczepionych przez pryzmat P (fig. 14) promieni, drugi pryzmat, zwrócony kątem załamującym do góry.

Sprawę rozszczepiania się światła wyjaśnił po raz pierwszy Newton.

§ 17. **Linie Fraunhofera.** Wyobraźmy sobie, żeśmy w jakikolwiek sposób zatrzymali w drodze pewną część rozszczepionych promieni, padających na ścianę (fig. 14), np., że zatrzymaliśmy grupę promieni żółtych o pewnej określonej łamliwości. Cóż nastąpi? Oczywiście, w tej okolicy widma, gdzie wogóle padają promienie żółte, znajdze się teraz miejsce, na które nie padną żadne promienie, wskutek czego miejsce to pozostanie nieoświetlonem i utworzy w barwnej wstędze widmowej czarną przerwę, w postaci poprzecznej pręgi o szrokości, zależnej od szerokości zatrzymanej wstążki promieni.

Przypatrując się bliżej widmu światła słonecznego, można zauważyć, że mimo pozornej cią-

głości, jest ono poprzecinane w wielu miejscach wązkiemi czarnemi pręgami czyli liniami. Od nazwiska badacza, który je odkrył, linie te zostały nazwane *liniami Fraunhofera*. Istnienie tych ciemnych przerw w barwnej wstędze widmowej naprowadza nas na przypuszczenie, że w świetle, które otrzymujemy od Słońca, brakuje pewnych określonych gatunków promieni; mianowicie brakuje promieni o łamliwości takiej, że przy niej musiałyby one paść na te właśnie miejsca widma,gdzie w rzeczywi-
(porównaj § 19).

§ 18. **Analiza spektralna.** Badając widmo, otrzymane od rozżarzonego ciała stałego lub cieczy, przekonywamy się, że jest ono zupełnie
stości występują linie *Fraunhofera*
ciągłe, to znaczy, że nie widać żadnych przerw w jego barwnej wstędze, której odcienie, począwszy od czerwonego, a skończwszy na fioletowym, przechodzą jeden w drugi całkiem niedostrzegalnie. Takie ciała wysyłają więc światło, w którem znajdujemy promienie wszelkiej możliwej łamliwości, począwszy od największej, właściwej skrajnym fioletowym, kończąc na najmniejszej, cechującej skrajne czerwone. Rozżarzony węgiel lampy łukowej daje takie widmo ciągłe.

Całkiem inaczej przedstawia się widmo rozżarzonego gazu lub pary metalowej. Jeżeli w widmie światła słonecznego mieliśmy jasną tę-

czową wstęgę, poprzecinaną tylko wąziutkiemi l i n i a m i c i e m n e m i (fig. 15), to widmo rozżarzonego gazu, przeciwnie, przedstawia nam się jako zbiór mniejszej lub większej liczby oddzielnych b ł y s z c z ą c y c h l i n i j,

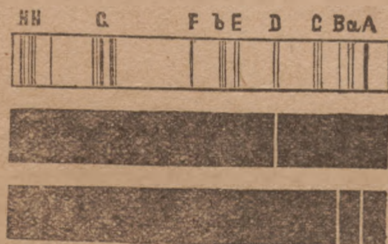


Fig. 15.

rzuconych na tło ciemnej wstęgi, przyczem linie te są dla każdego gazu inne. Tak np. w widmie pary sodu uderza nas przedewszystkiem silnie błyszcząca linia żółta (fig. 15 c) w części widma, odpowiadającej barwie żółtej widma słonecznego; w widmie wodoru spostrzegamy trzy główne linie błyszczące: pomarańczową, zielonawo-niebieską i niebieską (fig.15b)itd. Jeżeli więc mogliśmy powiedzieć, że w widmie słonecznem b r a k u j e tylko niektórych promieni, to o widmie światła,otrzymanego od rozżarzonego gazu, należy powiedzieć, że p o s i a d a ono tylko niektóre promienie. A zatem, widmo gazu jest do pewnego stopnia odwrotnością widma słonecznego.

Ponieważ w widmie pary sodu znajdujemy

zawsze linię żółtą, w widmie wodoru — trzy wyżej wymienione linie barwne i wogóle w widmie każdego gazu — linie błyszczące, charakterystyczne dla tego gazu; ponieważ dalej płomień, w którym żarzy się mieszanina kilku gazów, daje w widmie zbiór wszystkich linij błyszczących, należących do tych gazów, przyczem każda linia zajmuje w widmie mieszaniny dokładnie to samo miejsce, które zajmowałaby w widmie pojedyńczego gazu, przeto rozpatrywanie widma płomienia prowadzi wprost do wskazania, jakie mianowicie gazy lub pary żarzą się w tym płomieniu. Tym właśnie sposobem, z obecności w danem widmie pewnych linij błyszczących, zawczasu poznanych w widmach ciał pojedyńczych, a n a l i z a spektralna wnosi o obecności odpowiednich ciał w płomieniu, z którego otrzymujemy dane widmo. Metoda ta odznacza się niesłychaną czułością, zdolna jest bowiem wykryć obecności np. jednej milionowej części miligrama sodu. Przyrząd, służący do badań analityczno-spektralnych, nosi miano s p e k t r o s k o p u; zasadniczą jego częścią jest pryzmat rozszczepiający.

§ 19. **Widmo absorpcyjne.** Powiedzieliśmy wyżej, że dzięki liniom Fraunhofera widmo słoneczne wygląda tak, jak gdyby niektórych promieni do niego nie dopuszczono przez zatamowanie im dostępu do powierzchni, na której się widmo zarysowuje.

Z drugiej strony wiadomo, że wiele ciał, nawet przezroczystych, znalazłszy się na drodze wiązki świetlnej, nie przepuszcza przez siebie niektórych rodzajów promieni; powiadamy, że w takich razach zachodzi pochłanianie czyli absorpcya tych gatunków promieni. Tak np. szkło czerwone pochłania ze światła białego wszystkie promienie prócz czerwonych; szkło kobaltowe niebieskie przepuszcza tylko pewną część promieni czerwonych oraz promienie niebieskie itd. Jeżeli więc na drodze promieni, padających na pryzmat, umieścimy np. szybkę szkła kobaltowego, to otrzymamy tylko część niebieską widma, oraz jedną pręgę świetlną w jego części czerwonej, reszta zaś wstęgi widmowej pozostaje ciemną. Podobnież w widmie światła, które przeszło przez szybkę czerwoną, znajdujemy tylko część czerwoną, pozostałe zaś barwy zostają zniesione. Widma w ten sposób zmodyfikowane noszą miano widm absorpcyjnych.

Warstwa rozżarzonego gazu posiada, na podobieństwo barwnej szybki szklanej, zdolność pochłaniania niektórych promieni. Przekonano się, że każdy gaz pochłania z przechodzącego przezeń światła te właśnie gatunki promieni, które sam wysyła (w stanie rozżarzenia). Z drugiej strony wiemy (§ 18), że gaz w stanie rozżarzenia wysyła tylko pewne ściśle określone grupki promieni, które w jego własnem wid-

mie ujawniają się w postaci oddzielnych błyszczących linij. A zatem, warstwa takiego gazu, znalazłszy się na drodze światła, pochodzącego np. z lampy łukowej, pochłania z niego te właśnie grupki oddzielne promieni, które w czystem widmie światła elektrycznego (tj. w widmie ciągłem) padłyby na miejscu, odpowiadające owym liniom. Ponieważ wszystkie inne promienie przejdą swobodnie przez warstwę gazu i padną na właściwe miejsca widma, przeto ostatecznym wynikiem będzie ukazanie się w widmie, otrzymanem w tych warunkach, ciemnych linij w miejscach, w których w widmie czystem danego gazu występują charakterystyczne dla niego linie błyszczące.

Rozumowaniu temu możnaby postawić zarzut następujący: Przecież warstwa rozżarzonego gazu nietylko przecina drogę niektórym promieniom lampy łukowej, lecz, będąc jednocześnie samodzielnem źródłem światła, wysyła te same gatunki promieni, tj. gatunki, które powinnyby paść w widmie właśnie na miejsca nie oświetlone. Dlaczegoż więc linie te pozostają nieoświetlonemi? Przyczyna leży w tem, że zazwyczaj natężenie świetlne (§ 21) rozżarzonej warstwy gazowej jest bardzo słabe w porównaniu z siłą światła lampy łukowej, wskutek czego blask własnych linij gazu, rzuconych na odpowiednie ciemne linie widma, ginie wobec świetności pozostałych części widma i w osta-

tecznym wyniku linie wydają się czarnemi.

Tak np. warstwa rozżarzonej pary sodu, umieszczona na drodze promieni lampy łukowej, pochłania z jej widma promienie, odpowiadające tej samej linii żółtej, która występuje w czystem widmie sodu. Wskutek tego w miejscu widma obserwacyjnego, odpowiadającem linii żółtej sodu, ukazuje się linia ciemna. Wprawdzie na to samo miejsce warstwa rozżarzonego sodu rzuca i teraz swoją linię błyszczącą, atoli przy dostatecznej sile lampy blask tej linii ginie pośród jaskrawego blasku oświetlonej wstęgi widmowej i dane miejsce pozostaje ostatecznie ciemnem.

Całkiem podobnie warstwa rozżarzonego wodoru, umieszczona przed lampą łukową, spowoduje wystąpienie trzech linii czarnych w tych samych trzech miejscach, w których, w widmie czystem wodoru, otrzymaliśmy jego 3 linie błyszczące (fig. 15). I wogóle, widmo absorpcyjne gazu rozżarzonego jest odwróceniem jego widma zwykłego czyli tak zwanego emisyjnego: gdzie w tem ostatniem występują linie błyszczące, tam w pierwszem mamy linie ciemne. Widmo absorpcyjne mieszaniny gazów jest odwróceniem mieszaniny emisyjnego widma tej mieszaniny.

Stwierdzono, że linie Fraunhoferowskie, występujące w widmie słonecznem, są odwróceniami linii błyszczących wielu znanych nam ciał

ziemskich, jak żelaza, wapnia, sodu, chromu itp., tak iż na widmo Słońca można się zapatrywać, jako na widmo absorpcyjne mieszaniny rozżarzonych par owych metali. W związku z tem znajduje się hipoteza, że Słońce składa się z rozżarzonego jądra stałego lub ciekłego otoczonego atmosferą rozżarzonych gazów; jądro odpowiada lampie z naszego doświadczenia i dawałoby, gdyby świeciło samo, widmo ciągłe; atmosfera par, przejmując pewne określone gatunki promieni, wysyłanych przez jądro, jest przyczyną powstawania linij ciemnych. Tylko niektóre z tych linij zawdzięczają swe powstanie przejściu promieni słonecznych przez atmosferę ziemską.

W podobny sposób wyprowadzać można wnioski, dotyczące obecności naszych ziemskich pierwiastków na gwiazdach i mgławicach.



V.

FOTOMETRYA

§ 20 **Natężenie oświetlenia.** Jedno i to samo źródło oświetla rozmaicie silnie powierzchnię ściany, zależnie do tego, czy umieścimy je daleko od ściany, czy też blisko i czy promieniom jego każemy padać na ścianę prostopadle, czy też ukośnie.

Wyobraźmy sobie dwa punkty świecące, np. dwie jednakowe świece, z których każda umieszczona jest w środku pokoju o kształcie kulistym, i niech jeden z tych pokojów ma promień 3 razy większy,aniżeli drugi.Ilość światła, wysyłanego przez świecę w ciągu jednostki czasu,np. w ciągu sekundy, nie zależy, oczywiście od tego, czy świeca świeci w pokoju większym czy mniejszym; a ponieważ świece nasze są jednakowe, przeto wysyłają one ilości światła równe. Ponieważ jednak świeca, stojąca w pokoju mniejszym, rzuca całą ilość swego światła na powierzchnię mniejszą, aniżeli świeca, stojąca w pokoju większym, przeto ściany pierwszego pokoju oświetlone będą silniej od ścian drugiego pokoju, tj. na każdy centymetr kwadratowy powie-

rzchni w pierwszym pokoju padnie światła więcej, aniżeli w drugim, mianowicie tyle razy więcej, ile razy pierwsza powierzchnia jest mniejsza od drugiej. Geometrya uczy, że powierzchnia kuli jest proporcyonalna do kwadratu jej promienia, tj. że z dwóch kul nierównych, kula o promieniu 2, 3, 10 razy większym ma powierzchnię 4 (2×2), 9 (3×3), 100 (10×10) razy większą; a zatem każdy centymetr ściany w naszym pokoju kulistym mniejszym, oświetlony będzie 9 razy silniej, aniżeli w pokoju większym. Na tej samej zasadzie, z pomiędzy dwóch kwadracików centymetrowych, oświetlonych jedną i tą samą świecą, a ustawionych płaszczyznami swemi prostopadle do kierunku jej promieni. kwadracik 3 razy bliższy źródła, otrzymuje w każdej sekundzie ilość światła 9 razy większą. Uogólniając ten wynik, możemy powiedzieć, że ilość światła, padająca w ciągu sekundy na jednostkę powierzchni, ustawionej prostopadle do kierunku promieni, jest odwrotnie proporcyonalna do kwadratu z odległości tej powierzchni od źródła. Oczywiście, jest to słuszne w takim tylko razie, jeżeli ośrodek, w którym rozchodzi się światło, jest zupełnie przezroczysty, tak, iż żadna część światła nie zostaje po drodze zatrzymana.

Uwaga. Mniej lub więcej jasny wygląd
ści padającego na nią światła, lecz także od
oświetlonej powierzchni zależy nie tylko od ilo-

właściwości samej powierzchi Tak np. z dwóch ścian, oświetlających jednakowo, biała wyda nam się jaśniejszą od szarej.

Kawałek tektury, umieszczony pomiędzy świecą a ścianą, prostopadle do kierunku promieni świetlnych, zatrzymuje większą ich wiązkę, aniżeli tenże kawałek, umieszczony jakkolwiek ukośnie: w pierwszym wypadku powierzchnia jego, otrzymując więcej promieni, będzie silniej oświetlona aniżeli w drugim.

§ 21. **Natężenie źródła świetlnego.** Natężeniem albo siłą danego źródła świetlnego nazywamy ilość światła, którą źródło to wysyła w ciągu jednostki czasu; o ilości tej możemy wyrobić sobie pewne pojęcie, obserwując oświetlenie, wytworzone przez dane źródło na danej powierzchni.

Dwa źródła niejednakowe silne mogą dać na danej powierzchni oświetlenia jednakowo silne, jeżeli zostaną umieszczone w odległościach niejednakowych od tej powierzchni. Z tego, co było powiedziane o słabnięciu oświetlenia ze wzrastaniem odległości od źródła, wynika, że do otrzymania powyższego skutku potrzeba (w razie powierzchni, prostopadłej do kierunku promieni), żeby źródło 2, 3, 10 razy silniejsze umieszczone było w odległości 4, 9, 100 razy mniejszej.

Na takiem zrównywaniu oświetleń opiera się metoda porównywania natężeń dwóch źródeł świetlnych zapomocą fotometru Rumforda

(fig. 16). Dwa źródła, których natężenia zamierzamy porównać, np. lampę S i świecę C, staramy się, drogą prób kolejnych, ustawić w

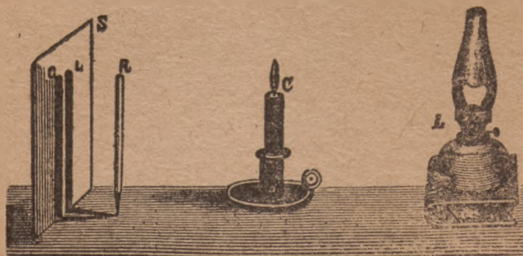


Fig. 16.

takich odległościach od ekranu S, aby rzucane przez nie cienie L i C jednego i tego samego drążka R były jednakowo silne, co jest oznaką, że i oświetlenia, wytwarzane na ekranie przez lampę i świecę, są jednakowo silne. Jeżeli to osięgnięciu tej równości okaże się, że lampa stoi 2, 3, 10 razy bliżej od ekranu, aniżeli świeca, to jest to dowodem, że natężenie świetlne pierwszej jest 4, 9, 100 razy większe od natężenia drugiej.

Za jednostkę natężenia przyjmuje się najczęściej natężenie świecy stearynowej francuskiej (bougie), w której spala się 10 gramów stearyny na godzinę, albo też 9 razy większe natężenie lampy olejnej określonego typu, zwanej lampą Carcela. Obliczono, że natężenie świetlne Słońca równa się natężeniu 300,000 świec francuskich.

VI.

TEORYA UNDULACYJNA

§ 22. **Teorya emisyi.** Newton przypuszczał, że promienie światła są szeregami biegnących prostoliniowo ciałek materyalnych nieważkich, które, uderzając w końcu o siatkówkę oka, wywołują wrażenie świetlne. Napotkawszy gładką powierzchnię, np. powierzchnię zwierciadła, szereg takich ciałek odbija się na podobieństwo szeregu kulek sprężystych; przechodząc z jednego ośrodka do drugiego o gęstości odmiennej, ciałka zmieniają swą prędkość, co, w razie jeżeli kierunek padania jest ukośny, powoduje załamywanie się wiązki promieni. Teorya ta nosi w nauce miano teoryi emisyi (od wyrazu łacińskiego emitto = wysyłam), wychodzi bowiem z założenia, że punkt świecący wyrzuca z siebie owe miryady ciałek świetlnych.

§ 23. **Teorya undulacyjna.** Współczesny Newtonowi fizyk Huygens wygłosił całkiem odmienny pogląd na istotę światła; pogląd ten, znany pod nazwą hipotezy undulacyjnej czyli hipotezy fal, dopiero po stu latach walki odniósł stanowcze zwycięstwo nad hipotezą emisyi. Podług teoryi undulacyjnej, w promieniu

świetlnym nic nie przenosi się ze źródła do oka we właścimew słowa tego znaczeniu, lecz promień ten jest jedynie kierunkiem, w którym rozchodzą się w przestrzeni pewne zmiany we wzajemych położeniach cząsteczek ośrodka, zwanego eterem świetlnym.

Eter wypełnia wszelką znaną nam przestrzeń, nawet tę, która pozbawioną jest zupełnie zwykłej materyi, jak np. próżnię Torricellego. Wyrażając się obrazowo, można powiedzieć, że pomiędzy promieniem światła w pojmowaniu Newtona, a tymże promieniem w pojmowaniu Huygensa, zachodzi taka sama różnica, jaka zachodzi pomiędzy drogą, na której wiadomość z punktu wysłania do punktu przeznaczenia przenosi jeden i ten sam posłaniec, a drogą, na której szereg rozstawionych wartowników podaje sobie tę wiadomość z ust do ust.

Uderzając drążkiem w koniec linki, napiętej pomiędzy dwoma punktami stałymi, wywołujemy w pierwszej chwili tuż przy miejscu uderzenia wygięcie, kształtem swym przypominające leżącą literę S (S), które w następnych chwilach posuwa się od miejsca uderzenia ku drugiemu końcowi linki. Powiadamy wtedy, że wzdłuż linki biegnie fala poprzeczna. Przyczyna powstawania takiej fali leży w tem, że wskutek spójni, jaka istnieje pomiędzy cząstkami linki, wszystkie one jedna za drugą powtarzają z biegiem czasu ruch pierwszej cząstki,

którą uderzyliśmy drążkiem. Wyrazem fala poprzeczna zaznaczamy ten fakt, że przy wytwarzaniu owego wygięcia, cząstki linki opuszczają się na dół i podnoszą do góry w kierunku prostopadłym do długości linki, a więc poprzecznym do kierunku posuwania się fali. Całkiem inaczej mają się rzeczy w falach podłużnych, z któremi zapoznaliśmy się, badając rozchodzenie się głosu (11 § 26); w tych ostatnich bowiem, zarówno pierwsza warstwa cząstek, jak i wszystkie następne ich warstwy, odbywają swoje wycieczki tam i napowrót w kierunku równoległym do kierunku biegu fali.

Powtarzając uderzenia drążkiem, możemy wywołać nieprzerwaną kolej fal, biegnących jedna za drugą wzdłuż linki.

Podług hipotezy undulacyjnej każdy promień światła jest jak gdyby linką cząsteczek eteru, będącą w stanie takiego rozkołysania, do którego podniety dostarcza drganie pierwszej cząsteczki szeregu, stykającej się bezpośrednio ze źródłem świetlnem.

Długość fali świetlnej, czyli długość,na którą w szeregu nieruchomych przedtem cząseczek eteru zdąża rozciągnąć się stan ruchu w czasie, gdy cząstka dająca podnietę do tego ruchu,wykonywa jedno całkowite drganie, jest rozmaita dla różnych barw i waha się pomiędzy 9,69 mikrona (mikron=0,001 milimetra) dla barwy czerwonej i 0,36 mikrona dla barwy fijoletowej.

Liczby te stosują się do próżni. Prędkość rozchodzenia się światła w próżni jest jednakowa dla wszystkich barw i wynosi okrągło 300,000 kilometrów na sekundę; na taką więc długość rozszerza się stan ruchu w szeregu cząsteczek eteru w przeciągu jednej sekundy. Stąd wynika, że w promieniu światła czerwonego każda cząsteczka eteru wykonać musi $\frac{300000000000000}{0,69}$ =435 biljonów całkowitych drgań na sekundę, zaś w promieniu światła fijoletowego — $\frac{300000000000000}{0,36}$ = 833 biljony takich drgań.

Załamywanie się wiązki świetlnej przy przechodzeniu z ośrodka do ośrodka jest wynikiem różnicy pomiędzy prędkościami rozchodzenia się światła w tych ośrodkach. Z faktów, że przy przejściu z powietrza do wody promień światła przybliża się do pionu (§ fig. 9). teorya undulacyjna wyprowadza wniosek, że w wodzie prędkość światła jest mniejsza, aniżeli w powietrzu, a bezpośrednie pomiary potwierdzają w zupełności ten wniosek, gdy tymczasem z teoryi emisyi wynika,że prędkość światła w wodzie powinna być większa.

W próżni światło wszystkich barw posiada, jak wspominaliśmy, prędkość jednakową, ale w przestrzeni, wypełnionej zwykłą materyą, a

więc w powietrzu, wodzie, szkle etc. fale świetlne różnych barw rozchodzą się z prędkością rozmaitą. Jednym ze skutków takiego stanu rzeczy jest rozszczepienie się światła:promienie czerwone rozchodzące się prędzej, posiadają łamliwość mniejszą, aniżeli promienie fijoletowe, rozchodzące się wolniej.

Odbijanie się światła teorya undulacyjna tłómaczy odbijaniem się fal eteru, które odbywa się podług praw analogicznych do praw odbijania się fal głosowych.

§ 24. **Interferencya światła.** W lince, pokrytej biegnącemi falami poprzecznemi, mamy w każdej chwili cząstki, wychylające się z położenia równowagi w jedną stronę, i cząstki, wychylające się w stronę przeciwną; tak samo zachowują się, podług teoryi undulacyjnej, cząsteczki eteru w rozkołysanym szeregu, stanowiącym promień świetlny. Wyobraźmy sobie,że jedna z cząsteczek takiego szeregu należy jednocześnie do drugiego szeregu, tj. że w miejscu, przez nią zajmowanem, schodzą się dwa promienie świetlne, tak iż cząstezcka nasza bierze udział w tworzeniu się fal w obu tych szeregach. Wskutek tego w każdej danej chwili ruch rzeczywisty cząsteczki jest wynikiem dwóch ruchów składowych, które, zależnie od względnych swych kierunków, mogą bądź wzmacniać się wzajemnie, bądź też osłabiać. W wypadku szczególnym,w którym dwie prędkości składowe

udzielone cząsteczce, mają, przy jednakowej wartości liczebnej, kierunki wprost przeciwne, nastąpi zupełne zniesienie ruchu — cząsteczka pozostanie w spoczynku. Ponieważ, według hipotezy undulacyjnej, natężenie światła w każdem miejscu zależy od wielkości wychylania cząsteczki z położenia równowagi, przeto zwiększeniu się tego wychylenia odpowiadać powinno wzmożenie się światła, zmniejszeniu się wychylania — osłabienie światła, a zupełnemu zanikowi ruchu cząsteczki — zupełny zanik światła. Doświadczenie potwierdza w zupełności te przewidywania teoryi. Normując bieg dwóch wiązek świetlnych w taki sposób, żeby w pewnych punktach przestrzeni cząsteczki eteru, wskutek otrzymywania jednakowo silnych lecz kierunkowo przeciwnych podniet do ruchu, musiały pozostać w spoczynku, możemy w tych punktach przestrzeni otrzymać ciemność, podobnie jak otrzymywaliśmy ciszę w miejscach intereferencyj dwóch odpowiednio dobranych fal dzwięcznych.

§ 25. **Polaryzacya światła.** W rozkołysanej lince, pokrytej falami poprzecznemi, drgania wszystkich cząstek odbywają się w jednej i tej samej płaszczyźnie, i w tej to płaszczyźnie mieszczą się płaszczyzny wszystkich wygięć, tworzących się na całym przebiegu linki. W promieniu świetlnym sprawa przedstawia się o tyle odmiennie, że w warunkach zwyczajnych

płaszczyzna drgań nie pozostaje tutaj stałą,lecz z biegiem czasu zmienia niezmiernie szybko swe położenie,tak,iż drgania cząsteczek eteru odbywają się jednocześnie we wszelkich możliwych kierunkach, prostopadłych do promienia. Taki promień światła nazywa się promieniem naturalnym w przeciwstwieniu do promienia spolaryzowanego, w którym na skutek oddziaływania pewnych wpływów zewnętrznych, drgania cząsteczek eteru odbywają się tylko w pewnej określonej płaszczyźnie. Rozmaite czynniki wywołać mogą polaryzacyę światła. Promień naturalny, rzucony na taflę szklanną pod kątem padania równym 75^0, odija się od niej jako promień spolaryzowany; przy przechodzeniu światła przez niektóre kryształy,jak np. przez szpat wapienny, wiązka światła naturalnego rozdziela się na dwie oddzielne wiązki, z których każda zawiera światło,spolaryzowane w innej płaszczyznie.



VII.

DZIAŁANIA PROMIENI CIEPLNE I CHEMICZNE

§ 26. **Widmo cieplne.** Ciepło, które uczuwamy w pobliżu gorącego pieca, pomimo przedzielenia warstwą chłodnego powietrza, nie dochodzi do nas drogą zwykłego przewodnictwa. Przypuszczamy, że na powierzchni pieca ciepło zamienia się na ruch falowy eteru i że ruch ten rozchodzi się w przestrzeni, na podobieństwo promieni świetlnych, a energia jego zamienia się napowrót na ciepło, skoro dane promienie padną na powierzchnię naszego ciała. Te niewidzialne promienie, za których pośrednictwem energia cieplna przenosić się może poprzez przestrzeń, pozbawioną zwykłej materyi, przedstawiają uderzające analogie z promieniami widzialnymi światła.

Ustawiwszy przed szparą spektroskopu, zamiast lampy, czyli źródła światła, ogrzane ciało ciemne, czyli źródło ciepła, można otrzymać w i d m o   c i e p l n e. Wiązka niewidzialnych promieni załamuje się w pryzmacie spektroskopu na podobieństwo wiązki świetlnej i, rozszczepiając się na wiązki różnej łamliwości,

daje na ekranie niewidzialną wstęgę widma cieplnego, którego istnienie stwierdzić można za pomocą bardzo czułego termometru. Pryzmat spektroskopu winien być nie ze szkła, które pochłania silnie promienie cieplne, lecz np. z soli kamiennej.

Odbijanie się promieni cieplnych można wykazać, umieszczając w ognisku jednego z dwóch zwierciadeł wklęsłych (fig. 17) koszyczek z tlejącymi węglami, a w drugim kawałeczek bawełny strzelniczej: rozdmuchując węgle, wywołujemy wybuch bawełny. Na dowód, że skutek wywołują tu jedynie promienie ciemne, nie zaś widzialne, można przytoczyć fakt, że eksplozya nie następuje, jeżeli pomiędzy jednem zwier-

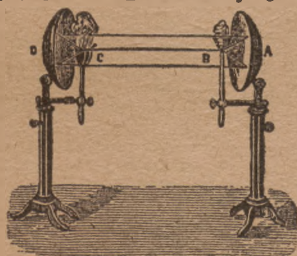


Fig. 17.

ciadłem a drugiem umieścić tafelkę szklaną, która przepuszcza promienie widzialne, lecz zatrzymuje ciemne.

Niewidzialne promienie zdolne są wytwarzać zjawiska interferencyi i ulegać polaryzacyi.

W wiązce światła słonecznego promienie cieplne przemieszane są z promieniami świetlnymi i, jeżeli je rzucić na pryzmat z soli kamiennej, to otrzymamy na ekranie widmo cieplne jednocześnie z widmem świetlnem. Badanie termoskopowe wykazuje, że na pewnej przestrzeni widmo cieplne i widmo świetlne przypadają razem, że atoli wstęga widmowa cieplna jest dłuższa od wstęgi świetlnej; sięgając bowiem nieco poza granicę barwy fijoletowej, ciągnie się ona na bardzo znacznej przestrzeni poza ostatniemi krańcami barwy czerwonej, stanowiąc tak zwaną pozaczerwoną część widma. Największe natężenie cieplne posiadają promienie, przypadające na żółtą część wstęgi.

Jeżeli niewidzialne promienie cieplne, grupując się przeważnie w okolicach czerwonej i pozaczerwonej, stanowią niejako jedno skrzydło widma świetlnego, to drugie skrzydło tego widma zajęte jest przez inny jeszcze gatunek promieni, mianowicie przez promienie tak zwane pozafijoletowe, również niewidzialne, jak i promienie cieplne, a odgrywające przeważną rolę w niektórych działaniach chemicznych.

§ 27. **Chemiczne działanie światła.** Światło wywiera wpływ bardzo wyraźny na przebieg niektórych spraw chemicznych. Tak np. mieszanina równych objętości gazów chloru i wodoru, będąc wystawiona na działanie promieni świetlnych, wybucha, dając nowe ciało

gazowe — kwas chlorowodorowy. Papier, w pewien sposób spreparowany, zawierający chlorek i azotan srebra, brunatnieje pod wpływem światła, które powoduje rozkład tych ciał. Stwierdzono, że w tym ostatnim wypadku rolę czynną grają promienie fijoletowe i pozafijoletowe.

§ 28. **Fotografia.** Otrzymywanie podobizn przedmiotów za pomocą fotografii opiera się na następującej zasadzie. Każdy przedmiot świecący lub tylko oświetlony, posiada, oczywiście, części jaśniejsze i części ciemniejsze; pierwsze wysyłają światła więcej, drugie mniej. Promienie silniejsze, pochodzące z części jaśniejszych przedmiotu, padając na płytkę uczuloną (którą bywa zazwyczaj tafelka szklana, pokryta warstewką żelatyny, zawierającej bromek srebra) zdążają wywołać jej odtlenienie w odpowiednich miejscach już wtedy, gdy promienie, które padają na płytkę z części ciemniejszych przedmiotu, ledwie że zaczynają swoją robotę. Tym sposobem, po pewnym czasie, zwanym czasem ekspozycyi, najbardziej zmienionemi chemicznie będą te miejsca płytki, na które padały promienie z części przedmiotu najjaśniejszych; skutków tych jednak na razie nie widzimy i trzeba je dopiero w y w o ł a ć. Uskuteczniamy to przez zanurzenie płytki w zasadowy roztwór kwasu pirogallusowego, który powodu osadzenie się srebra w miejscach,

zmienionych przez działanie światła, i to w ilości tym większej, im to działanie światła było silniejsze. Tak wywołany obraz **utrwalamy**, zmywając podsiarczynem sodu nierozłożoną resztę czułej substancyi, i otrzymujemy tym sposobem tak zwaną negatywę, w której miejscom oryginału jasnym odpowiadają miejsca zaciemnione wskutek osadzenia się srebra, i, odwrotnie, cieniom przedmiotu — światła. Jeżeli poprzez taką negatywę oświetlamy arkusik papieru uczulonego,to miejsca papieru, przypadające pod przezroczystemi miejscami negatywy, zczernieją pod działaniem światła, zaś miejsca, znajdujące się pod ciemnemi miejscami negatywy, będąc przez nią zabezpieczone od działania światła, zachowują barwę jasną niezmienioną. Otrzymamy obraz — tak zwana pozytywa—będzie zatem, co do rozkładu świateł i cieni, odwrotnością negatywy, a zatem identyczny z przedmiotem rzeczywistym.

§ 29. **O wysyłaniu i pochłanianiu promieni.** W jednej i tej samej temperaturze rozmaite substancye promieniują z rozmaitą siłą. Jeżeli powierzchnię naczynia metalowego, napełnionego wodą wrzącą, raz pokryjemy sadzami, a drugi raz odpolerujemy starannie, to czuły termoskop, ustawiony na drodze promieni cieplnych, wskaże za pierwsym razem przyrost temperatury 10 razy większy, aniżeli za drugim

razem. Sadze mają zdolność emisyi największą, metal polerowany najmniejszą.

Drut platynowy, ogrzewany przepływającym przez niego prądem elektrycznym, wysyła aż do temperatury 500°C. jedynie promienie ciemne, a więc promienie o długiej przeważnie fali. Dopiero począwszy od 500°C. zaczyna on wysyłać promienie widzialne, mianowicie promienie czerwone, tj. rozżarza się do czerwoności i zaczyna świecić. W miarę dalszego podnoszenia się temperatury ,do promieni czerwonych przyłączają się stopniowo promienie o fali coraz to krótszej, a więć żółte, zielone, niebieskie i wreszcie fijoletowe, a wtedy połączenie wszystkich tych barw sprawia wrażnie barwy białej. Następuje to w temperaturze około 1500°C.; powiadamy wtedy, że drut jest rozżarzony do białości. Przy wyższych jeszcze temperaturach powstają promienie pozafijoletowe, których obecność może być wykryta drogą fotografii.

Szkło przepuszcza przez siebie prawie wszystkie promienie świetlne, lecz pochłania ogromną część promieni cieplnych; to też tafla szklana, umieszczona naprzeciwko otwartych drzwiczek pieca, nie zmniejszając wcale blasku ogniska, stanowi bardzo skuteczną ochronę od gorąca. Podobny skutek wywiera warstwa wody.

Wprost przeciwnie zachowuje się płyn taki, jak np. roztwór jodu w siarczku węgla, prze-

puszcza bowiem bardzo mało światła, a natomiast nie tamuje wcale przejścia promieniom cieplnym. Tafla z soli kamiennej nie zatrzymuje ani światła, ani ciepła, nie posiada więc prawie zupełnie zdolności pochłaniających. Gazy również posiadają zdolność absorpcyjną w stopniu bardzo słabym.

KONIEC